

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**“ESTUDIO DINÁMICO Y ESTÁTICO DE CIMENTACIONES  
QUE SOPORTAN EQUIPO PETROLERO E INDUSTRIAL.”**

**LUCA MATEO LIMAICO ÁLVAREZ**

**DIRECTOR: ING. MARCELO GUERRA AVENDAÑO.**

**QUITO, 2015.**



## **AGRADECIMIENTO**

A dios por ser la guía en todos estos años.

A mis padres por todo su apoyo incondicional, amor y por ser la guía en este camino  
que recorrí.

A mis hermanos por siempre estar ahí cuando les necesité.

A los ingenieros Marcelo Guerra, Juan Carlos Garcés y Oscar Jaramillo por  
compartir sus sapiencias y brindarme su apoyo en la realización de esta disertación.

A todos los docentes que aportaron a mi formación a lo largo de la carrera y a la  
escuela de Civil de la facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del  
Ecuador.

## **DEDICATORIA**

A la Virgen Dolorosa por su bendición permanente y su protección.

A mi madre por su amor infinito, sus consejos, su comprensión y por ser mi modelo a seguir y enseñarme a luchar por cada cosa.

A mi padre por todo su amor, por ser esa persona incondicional, por sus lecciones y enseñanzas en cada momento que me hacen ser más persona cada día, por demostrarme que nunca es tarde, gracias papá...

A mis hermanos Renato y Matías por ser siempre mis mejores amigos, soportarme y apoyarme en mis peores momentos.

A los buenos amigos que me brindaron la vida y la carrera.

A mi amiga, colega y princesa Adri.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>TABLA DE CONTENIDOS .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE IMÁGENES .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES .....</b>	<b>XV</b>
<b>Alcance .....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivo general. ....</b>	<b>19</b>
<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>19</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPITULO I CONCEPTOS GENERALES .....</b>	<b>24</b>
<b>1.1 Tipos de maquinaria.....</b>	<b>24</b>
1.1.1 Maquinas centrifugas. ....	24
1.1.1.1 Bombas y compresores centrífugos.....	25
1.1.1.2 Turbogeneradores.....	25
1.1.2 Máquinas reciprocantes.....	26
1.1.2.1 Máquinas de Vapor. ....	27
1.1.2.2 Bombas de embolo. ....	27
1.1.2.3 Motores de Diésel y gasolina. ....	27
1.1.2.4 Compresores de émbolo. ....	27
1.1.3 Máquinas de impacto .....	28
<b>1.2 Conceptos de dinámica aplicados a las cimentaciones.....</b>	<b>29</b>
1.2.1 Vibración.....	29
1.2.2 Período. ....	29
1.2.3 Movimiento periódico.....	30
1.2.4 Ciclo. ....	30
1.2.5 Frecuencia. ....	30
1.2.6 Frecuencia natural. ....	30
1.2.7 Vibración forzada.....	31
1.2.8 Vibración libre. ....	31
1.2.9 Amplitud de movimiento. ....	31
1.2.10 Grados de libertad. ....	31
1.2.11 Resonancia. ....	32
1.2.12 Relación de frecuencias.....	33
1.2.13 Modo principal de vibración. ....	33
1.2.14 Amortiguamiento. ....	34
<b>1.3 Sistemas de un grado de libertad (1GDL).....</b>	<b>34</b>
1.3.1 Sistemas de 1GDL sujetos a vibración libre. ....	34
1.3.2 Sistemas de 1GDL sujetos a vibración forzada.....	37
1.3.3 Fuerza transmitida a la cimentación.....	44

<b>1.4</b>	<b>Sistemas de dos grados de libertad (2GDL)</b>	<b>45</b>
1.4.1	Sistemas de 2GDL sujetos a vibración libre.	46
1.4.2	Sistemas de 2GDL sujetos a vibración forzada.	50
<b>1.5</b>	<b>Criterios de diseño de cimentaciones para maquinarias</b>	<b>56</b>
1.5.1	Límites de falla del suelo.	58
1.5.2	Límites de falla de la cimentación.	58
1.5.3	Límite de servicio por la vibración de la maquinaria.	59
1.5.4	Límite por resonancia.	60
1.5.5	Límite por transmisión de vibraciones.	61
<b>1.6</b>	<b>Propiedades a considerar en el diseño de una cimentación.</b>	<b>61</b>
1.6.1	Asentamientos.	61
1.6.2	Asentamientos diferenciales.	62
1.6.3	Vuelco.	62
1.6.4	Torsión.	63
1.6.5	Provisiones para accesorios.	64
1.6.6	Dilatación.	64
1.6.7	Protección.	65
1.6.8	Vibración.	65
<b>CAPITULO II TIPOS DE CIMENTACIONES</b>		<b>68</b>
<b>2.1</b>	<b>Clasificación de las cimentaciones.</b>	<b>71</b>
2.1.1	Cimentaciones en bloque.	72
2.1.2	Cimentaciones profundas.	73
2.1.2.1	Cimentaciones por Pilotes.	74
2.1.3	Cimentaciones por pórticos.	75
2.1.4	Cimentaciones combinadas en bloque.	76
<b>CAPITULO III ACCIONES DINÁMICAS SOBRE CIMENTACIONES</b>		<b>77</b>
<b>3.1</b>	<b>Acciones permanentes.</b>	<b>77</b>
<b>3.2</b>	<b>Acciones variables.</b>	<b>78</b>
<b>3.3</b>	<b>Acciones Térmicas</b>	<b>78</b>
<b>3.4</b>	<b>Carga de par torque normal.</b>	<b>79</b>
<b>3.5</b>	<b>Cargas dinámicas.</b>	<b>79</b>
3.5.1	Fuerza dinámica en máquinas centrífugas.	81
3.5.2	Fuerza dinámica en máquinas reciprocantes.	85
<b>CAPITULO IV ANÁLISIS DINÁMICO Y MODELACIÓN DE CIMENTACIONES.</b>		<b>88</b>
<b>4.1</b>	<b>Modos de Vibración.</b>	<b>89</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos para el análisis dinámico.</b>	<b>89</b>
4.2.1	Método Empírico	90
4.2.1.1	Solución de Tschebotarioff:	90
4.2.1.2	Solución de Alpan:	91

<b>4.2.2</b>	<b>Método basado en considerar al suelo como un medio Semi-Infinito elástico.</b>	<b>92</b>
4.2.2.1	Solución de Sung-Richard.....	93
4.2.2.2	Solución propuesta por Arnold, Bycroft y Warburton. ....	96
4.2.2.3	Solución de Hsieh.....	99
<b>4.2.3</b>	<b>Método analítico para determinar la frecuencia natural de una cimentación.....</b>	<b>101</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Método de Masa-Resorte equivalente.....</b>	<b>103</b>
<b>4.3</b>	<b>Desplazamientos y rotaciones.....</b>	<b>119</b>
<b>4.4</b>	<b>Amortiguadores.....</b>	<b>124</b>
<b>4.5</b>	<b>Ecuaciones de equilibrio para sistemas de seis grados de libertad.....</b>	<b>128</b>
<b>4.6</b>	<b>Parámetros especiales a considerar en la etapa de planificación.....</b>	<b>130</b>
<b>4.7</b>	<b>Datos de diseño necesarios.....</b>	<b>132</b>
<b>4.8</b>	<b>Ejemplo de aplicación.....</b>	<b>132</b>
<b>4.9</b>	<b>Fuerza producida por un equipo recíproco.....</b>	<b>140</b>
<b>4.10</b>	<b>Puntos a considerar en la proyección de una cimentación tipo bloque de un equipo recíproco.....</b>	<b>141</b>
<b>4.10.1</b>	<b>Diseño Preliminar.....</b>	<b>141</b>
4.10.1.1	Vibración Vertical.....	141
4.10.1.2	Vibración Horizontal.....	141
4.10.1.3	Vibración de cabeceo.....	141
<b>4.10.2</b>	<b>Diseño Definitivo.....</b>	<b>142</b>
4.10.2.1	Vibración Vertical.....	142
4.10.2.2	Vibración conjunta de cabeceo y vibración horizontal.....	142
<b>4.11</b>	<b>Diseño de la cimentación de un TURBOGENERADOR GE LM-6000.</b>	<b>144</b>
<b>4.11.1</b>	<b>Materiales.....</b>	<b>145</b>
<b>4.11.2</b>	<b>Códigos y reglamentos a utilizarse.....</b>	<b>145</b>
<b>4.11.3</b>	<b>Cargas.....</b>	<b>145</b>
4.11.3.1	Cargas Muertas.....	145
4.11.3.2	Cargas Vivas.....	146
4.11.3.3	Cargas de Operación de los equipos.....	146
4.11.3.4	Cargas de Sismo.....	146
<b>4.11.4</b>	<b>Combinaciones de Cargas.....</b>	<b>152</b>
<b>4.11.5</b>	<b>Geometría de la cimentación.....</b>	<b>156</b>
<b>4.11.6</b>	<b>Análisis Pseudo-Dinamico de la cimentación.....</b>	<b>157</b>
<b>4.11.7</b>	<b>Modelación de la cimentación mediante el programa SAP2000 v16.0</b>	<b>167</b>
4.11.7.1	Tipo de Modelo.....	168
4.11.7.2	Geometría del modelo.....	168
4.11.7.3	Definición de los materiales y elementos.....	169

4.11.7.4	Discretización de la cimentación. ....	170
4.11.7.5	Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. ....	171
4.11.7.6	Restricciones del modelo. ....	172
4.11.7.7	Asignación de cargas ....	173
4.11.7.8	Definición de funciones para estados dinámicos de carga. ....	174
4.11.7.9	Definición del espectro de respuesta sísmico. ....	178
<b>4.11.8</b>	<b>Análisis de resultados del modelo. ....</b>	<b>180</b>
4.11.8.1	Análisis Modal ....	180
4.11.8.2	Análisis Dinámico.....	181
4.11.8.3	Análisis Estático ....	185
<b>4.11.9</b>	<b>Diseño Estructural. ....</b>	<b>190</b>
4.11.9.1	Determinación de la armadura superior. ....	190
4.11.9.2	Determinación de la armadura inferior. ....	190
4.11.9.3	Momento Resistente por cuantía mínima. ....	191
4.11.9.4	Aceros de refuerzo por flexión. ....	192
4.11.9.5	Diseño por Corte ....	193
4.11.9.6	Control de Agrietamiento. ....	194
<b>4.12</b>	<b>Diseño de la cimentación de una IMPRENTA Modelo SX103-8P HEILDELBURG. ....</b>	<b>195</b>
4.12.1	Materiales ....	195
4.12.2	Códigos y reglamentos a utilizarse. ....	196
4.12.3	Cargas.....	196
4.12.3.1	Cargas de Sismo.....	197
4.12.4	Combinaciones de Cargas. ....	202
4.12.5	Geometría de la cimentación.....	203
4.12.6	Análisis Pseudo-Dinámico de la cimentación.....	204
4.12.7	Modelación de la cimentación mediante el programa SAP2000 v17.0.	214
4.12.7.1	Discretización de la cimentación. ....	214
4.12.7.2	Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. ....	214
4.12.7.3	Definición de funciones para estados dinámicos de carga. ....	216
4.12.7.4	Definición del espectro de respuesta sísmico. ....	218
<b>4.12.8</b>	<b>Análisis de Resultados. ....</b>	<b>220</b>
4.12.8.1	Análisis Modal ....	220
4.12.8.2	Análisis Dinámico.....	221
4.12.8.3	Análisis Estático ....	227
<b>4.12.9</b>	<b>Diseño Estructural. ....</b>	<b>231</b>
4.12.9.1	Determinación de la armadura superior. ....	231
4.12.9.2	Determinación de la armadura inferior. ....	232
4.12.9.3	Momento Resistente por cuantía mínima. ....	232
4.12.9.4	Aceros de refuerzo por flexión. ....	234

4.12.9.5	Diseño por Corte .....	234
4.12.9.6	Control de Agrietamiento. ....	235
<b>CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>237</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>242</b>
<b>ANEXO 1 FOTOGRAFICO .....</b>		<b>244</b>
<b>ANEXO 2 – ESPECIFICACIONES TECNICAS FABRICANTE IMPRENTA HEILDELBERG .....</b>		<b>254</b>
<b>ANEXO 3 – PLANO TURBO GENERADOR TURBOGENERADOR GE LM-6000. ....</b>		<b>260</b>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1.1 - Diagrama de una maquina Centrífuga .....	25
IMAGEN 1.2 - Diagrama de maquina Reciprocante. (ACI Committee, 2004).....	26
IMAGEN 1.3 - Diagrama de Maquina de Impacto. (Hurtado) .....	28
IMAGEN 1.4 - Sistemas de Grados de Libertad (Dunham, 1968) .....	32
IMAGEN 1.5 - Sistema de un grado de libertad (Luca Limaico) .....	35
IMAGEN 1.6 - Ángulo Alfa en función de la relación de frecuencias para diversas cantidades de coeficiente de amortiguamiento. ....	39
IMAGEN 1.7 - Factor de ampliación dinámico como una función de la relación de frecuencias para diversas cantidades de coeficiente de amortiguamiento. ....	40
IMAGEN 1.8 - Transmisibilidad versus la relación de frecuencias para diferentes valores de amortiguamiento. ....	45
IMAGEN 1.9 - Sistemas de dos grados de libertad. (Luca Limaico) .....	46
IMAGEN 1.10 - Sistemas de dos grados de libertad con fuerza de excitación (Luca Limaico) .....	50
IMAGEN 1.11 - Sistemas de dos grados de libertad con fuerza de excitación (Luca Limaico) .....	52
IMAGEN 1.12 - Límites de amplitud del desplazamiento en función de la frecuencia. ....	60
IMAGEN 1.13 - Fenómeno de resonancia. Relación de frecuencia de la maquina a la frecuencia del sistema máquina-cimentación-suelo.....	61
IMAGEN 1.14 - Momento de Vuelco (Luca Limaico).....	63
IMAGEN 1.15 - Par de Torsión(Luca Limaico).....	64
IMAGEN 1.16 - Ejemplo de algunos principios de vibraciones. (Dunham, 1968) .....	67
IMAGEN 2.1 - Esquema de cimentación en bloque.....	73
IMAGEN 2.2 - Esquema de cimentación por pilotes .....	75
IMAGEN 2.3 - Esquema de cimentación en pórtico. ....	75
IMAGEN 2.4 - Esquema de cimentación combinada en bloque. ....	76
IMAGEN 3.1 - Esquema de maquina centrífuga (Luca Limaico) .....	82
IMAGEN 3.2 - Sistema giratorio con una sola masa. (Luca Limaico).....	83
IMAGEN 3.3 - Sistema giratorio con dos masas (Luca Limaico).....	84
IMAGEN 3.4 - Fuerzas excitadoras con masas rotatorias. (Dunham, 1968).....	84
IMAGEN 3.5 - Esquema de un pistón. (Luca Limaico) .....	85
IMAGEN 4.1 - Modos de Vibración. (ACI Committee, 2004) .....	89
IMAGEN 4.2 - Reducción de la frecuencia natural. (Dobry & Gazetas, 1986) .....	91
IMAGEN 4.3 - Distribución de Presiones. (Dobry & Gazetas, 1986).....	93
IMAGEN 4.4 - Fuerza constante de excitación y la rotación de la mesa de excitación .....	95
IMAGEN 4.5 - Fuerza constante de excitación y la rotación de la mesa de excitación .....	95
IMAGEN 4.6 – Caso de deslizamiento de la cimentación.....	97
IMAGEN 4.7 - Caso de volcamiento de la cimentación.....	98
IMAGEN 4.8 -Sistema Equivalente de Vibración Vertical (Hurtado) .....	103
IMAGEN 4.9 - Sistema Equivalente de Vibración Horizontal y de Cabeceo. (Hurtado)....	103
IMAGEN 4.10 - Sistema Equivalente de Vibración Torsional. (Hurtado).....	104
IMAGEN 4.11 - Constantes de forma para cimentaciones rectangulares.....	105

IMAGEN 4.12 - Valores de Rigidez Estática $K$ y Dinámica $K$ para Cimentaciones Corridas y Circulares .....	110
IMAGEN 4.13 - Valores de Rigidez Vertical Dinámica $K$ .....	112
IMAGEN 4.14 - Valores de Rigidez Horizontal Estática $K_y$ , $K_z$ .....	112
IMAGEN 4.15 - Coeficientes de Rigidez Dinámica Horizontal $K_y$ .....	113
IMAGEN 4.16 - Valores de Rigidez Dinámica para el Cabeceo $K_{ry}$ y $K_{rx}$ .....	114
IMAGEN 4.17 - Valores de la Rigidez en la Torsión $K_t$ .....	115
IMAGEN 4.18 - Valores de Amortiguamiento Horizontal $C_y$ .....	116
IMAGEN 4.19 - Amortiguamiento Vertical $C_z$ .....	116
IMAGEN 4.20 - Valores de Amortiguamiento para Movimientos Torsionales $C_t$ .....	117
IMAGEN 4.21 - Amortiguamiento para Efectos de Cabeceo.....	118
IMAGEN 4.22 - Desplazamiento Vertical.....	120
IMAGEN 4.23 - Desplazamiento Horizontal.....	120
IMAGEN 4.24 - Rotaciones alrededor de un eje Vertical. ....	121
IMAGEN 4.25 - Rotaciones alrededor de un eje Horizontal. ....	122
IMAGEN 4.26 - Cimentación con amortiguadores. ....	125
IMAGEN 4.27 - Esquema de Cimentación Bajo Resortes. ....	126
IMAGEN 4.28 - Sistema de Referencia para seis grados de libertad. (Luca Limaico) .....	129
IMAGEN 4.29- Ejemplo de Aplicación. (Luca Limaico).....	134
IMAGEN 4.30 - Ejemplo de Aplicación - Análisis Geométrico (Luca Limaico) .....	134
IMAGEN 4.31 - Ejemplo de Aplicación - Inercias. (Luca Limaico).....	136
IMAGEN 4.32 - Esquema de Vibración Acoplada (Cabeceo y Rotación). (Luca Limaico) 143	
IMAGEN 4.33 – Factor $S_a$ .....	148
IMAGEN 4.34 - Espectro de Diseño NEC - Turbogenerador. (Luca Limaico) .....	152
IMAGEN 4.35 - Geometría de la Cimentación. (Luca Limaico).....	156
IMAGEN 4.36 - Tipo de modelo (SAP 2000) .....	168
IMAGEN 4.37 - Geometría del modelo. (SAP 2000).....	169
IMAGEN 4.38 - Definición del material del modelo. (SAP 2000).....	169
IMAGEN 4.39 - Definición de la sección. (SAP 2000).....	170
IMAGEN 4.40 - Discretización de la cimentación. (SAP 2000) .....	171
IMAGEN 4.41 - Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. (SAP 2000) .....	172
IMAGEN 4.42 - Restricciones del modelo. (SAP 2000) .....	173
IMAGEN 4.43 - Asignación de cargas en el modelo(SAP 2000).....	173
IMAGEN 4.44 - Esquema de cargas en el modelo. (SAP 2000) .....	174
IMAGEN 4.45 - Función de Time History para Baja Presión. (SAP 2000).....	176
IMAGEN 4.46 - Función de Time History para Alta Presión. (SAP 2000) .....	176
IMAGEN 4.47 - Función de Steady State. (SAP 2000).....	178
IMAGEN 4.49 - Espectro de respuesta sísmico. (SAP 2000).....	179
IMAGEN 4.50 - Definición de fuerzas sísmicas. (SAP 2000) .....	179
IMAGEN 4.51 - Diagrama de momentos positivo, Eje Longitudinal. (SAP 2000) .....	186
IMAGEN 4.52 - Diagrama de Momentos Negativo, Eje Longitudinal. (SAP 2000) .....	186
IMAGEN 4.53 - Esquema general de momentos, Turbogenerador, Eje Longitudinal. (SAP 2000) .....	187
IMAGEN 4.54 - Diagrama de momentos positivo, Eje Transversal. (SAP 2000) .....	187
IMAGEN 4.55 - Diagrama de Momentos Negativo, Eje Transversal. (SAP 2000) .....	188

IMAGEN 4.56 - Esquema general de momentos, Turbogenerador, Eje Transversal. (SAP 2000) .....	188
IMAGEN 4.51 -Factor Sa. (NEC, 2013) .....	198
IMAGEN 4.52 - Espectro de Diseño NEC - Imprenta.....	202
IMAGEN 4.53 - Geometría de la Cimentación. (Luca Limaico).....	203
IMAGEN 4.57 – Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. (SAP 2000).....	215
IMAGEN 4.58 - Modelo Imprenta. (SAP 2000) .....	216
IMAGEN 4.59 - Función de Steady State para Baja y Alta Presión. (SAP 2000).....	218
IMAGEN 4.60 Diagrama de momentos negativo, Eje Longitudinal. (SAP 2000).....	227
IMAGEN 4.61 Diagrama de momentos positivo, Eje Longitudinal. (SAP 2000).....	228
IMAGEN 4.62 Esquema general de momentos sentido Longitudinal, Imprenta. (SAP 2000) .....	228
IMAGEN 4.63 Diagrama de momentos positivo, Eje Transversal. (SAP 2000).....	229
IMAGEN 4.64 Diagrama de momentos negativo, Eje Transversal. (SAP 2000).....	229
IMAGEN 4.45 Esquema general de momentos sentido Transversal, Imprenta. (SAP 2000) .....	230



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 - Relaciones para un sistema de un grado de libertad.....	43
TABLA 3.1 - Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas.....	78
TABLA 4.1 - Tabla de valores de F1 y F2 Método de HSIEH (Richart, Woods, & Hall, Vibrations of Soil Foundations., 1970).....	100
TABLA 4.2 - Valores de C en función del Suelo .....	102
TABLA 4.3 - Valores de $\alpha$ en función de la forma de la cimentación. ....	102
TABLA 4.4 - Constante de resorte equivalente para cimentaciones rígidas .....	104
TABLA 4.5 - Coeficientes de empotramiento para constantes de resorte .....	105
TABLA 4.6 - Relación de amortiguamiento equivalente para cimentaciones rígidas.....	106
TABLA 4.7 - Efecto de la profundidad de empotramiento en la relación de amortiguamiento .....	106
TABLA 4.8 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico. ....	107
TABLA 4.9 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico .....	108
TABLA 4.10 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico .....	109
TABLA 4.11 - Valores de $S_z$ para las diferentes formas de cimentación .....	111
TABLA 4.12 - Amplitudes Permisibles.....	123
TABLA 4.13 - Cimentación recomendada en función de la velocidad. (Hurtado) .....	131
TABLA 4.14 - Factor de Importancia de una estructura. ....	147
TABLA 4.15 - Clasificación del tipo de Suelo .....	148
TABLA 4.16 - Coeficientes de r. (NEC, 2013) .....	149
TABLA 4.17 - Factores de Zona Sísmica.....	149
TABLA 4.18 - Coeficientes de $\eta$ .....	149
TABLA 4.19 - Tipo de suelo y factores de sitio Fa. ....	149
TABLA 4.20 - Tipo de suelo y factores de sitio Fd.....	150
TABLA 4.21 - Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo Fs...	150
TABLA 4.22 - Coeficiente de reducción de respuesta estructural R (NEC, 2013) .....	151
TABLA 4.23-Combinaciones de Carga a Utilizarse-Turbogenerador (Luca Limaico).....	154
TABLA 4.24 - Resultados del Análisis Modal. (Luca Limaico) .....	180
TABLA 4.25 Velocidades máximas con Función Time History de Alta Presión .....	181
TABLA 4.26 Velocidades máximas con Función Time History de Baja Presión .....	182
TABLA 4.27 Desplazamientos máximos con función Steady State de Alta Presión .....	183
TABLA 4.28 - Desplazamientos máximos con función Steady State de Baja Presión. ....	184
TABLA 4.29 - Desplazamientos máximos con función Time History de Alta Presión. ....	184
TABLA 4.30 - Desplazamientos máximos con función Time History de Baja Presión.....	185
TABLA 4.31 - Momentos Máximos Actuales sobre la cimentación (Luca Limaico) .....	189
TABLA 4.32 - Desplazamientos verticales, Turbogenerador. (Luca Limaico).....	189
TABLA 4.33 - Factor de Importancia de una estructura. (NEC, 2013).....	197
TABLA 4.34 - Clasificación del tipo de Suelo (NEC, 2013) .....	198
TABLA 4.35 - Coeficientes de r. (NEC, 2013) .....	199

TABLA 4.36 - Factores de Zona Sísmica (NEC, 2013).	199
TABLA 4.37 - Coeficientes de $\eta$ (NEC, 2013).	199
TABLA 4.38 - Tipo de suelo y factores de sitio $F_a$ . (NEC, 2013)	199
TABLA 4.39 - Tipo de suelo y factores de sitio $F_d$ (NEC, 2013).	200
TABLA 4.40 - Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo $F_s$ . (NEC, 2013).	200
TABLA 4.41 - Coeficiente de reducción de respuesta estructural $R$ (NEC, 2013)	201
TABLA 4.42 -Combinaciones de Carga a Utilizarse-Imprenta (Luca Limaico)	203
TABLA 4.43 - Resultados del análisis Modal. (Luca Limaico)	221
TABLA 4.44 Velocidades Máximas con Función Time History de Alta Presión. (Luca Limaico)	222
TABLA 4.45 Velocidades Máximas con Función Time History de Baja Presión. (Luca Limaico)	223
TABLA 4.46 Desplazamientos máximos con función Steady State de Alta Presión. (Luca Limaico)	224
TABLA 4.47 Desplazamientos máximos con función Steady State de Baja Presión. (Luca Limaico)	225
TABLA 4.48 Desplazamientos máximos con función Time History de Alta Presión. (Luca Limaico)	226
TABLA 4.49 Desplazamientos máximos con función Time History de Baja Presión. (Luca Limaico)	227
TABLA 4.50 Desplazamientos Verticales, Imprenta. (Luca Limaico)	231

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec 1.1 .....	34
Ec. 1.2 .....	35
Ec1.3 .....	36
Ec 1.4 .....	36
Ec. 1.5 .....	36
Ec, 1.6 .....	36
Ec 1.7 .....	36
Ec 1.8 .....	37
Ec. 1.9 .....	37
Ec. 1.10 .....	38
Ec 1.11 .....	38
Ec. 1.12 .....	38
Ec. 1.13 .....	38
Ec. 1.14 .....	38
Ec 1.15 .....	39
Ec 1.16 .....	40
Ec 1.17 .....	41
Ec 1.18 .....	41
Ec 1.19 .....	41
Ec 1.20 .....	41
Ec 1.21 .....	42
Ec 1.22 .....	42
Ec 1.23 .....	42
Ec 1.24 .....	42
Ec 1.25 .....	42
Ec 1.26 .....	43
Ec 1.27 .....	44
Ec 1.28 .....	46
Ec 1.29 .....	46
Ec 1.30 .....	46
Ec 1.31 .....	47
Ec 1.32 .....	47
Ec 1.33 .....	47
Ec 1.34 .....	47
Ec 1.35 .....	47
Ec 1.36 .....	47
Ec 1.37 .....	47
Ec 1.38 .....	48
Ec 1.39 .....	48
Ec. 1.40 .....	48
Ec. 1.41 .....	48
Ec 1.42 .....	49

Ec 1.43 .....	49
Ec 1.44 .....	49
Ec 1.45 .....	49
Ec 1.46 .....	49
Ec 1.47 .....	50
Ec. 1.48 .....	50
Ec. 1.49 .....	50
Ec 1.50 .....	51
Ec 1.51 .....	51
Ec 1.52 .....	51
Ec 1.53 .....	51
Ec 1.54 .....	51
Ec 1.55 .....	52
Ec 1.56 .....	52
Ec 1.57 .....	52
Ec 1.58 .....	52
Ec 1.59 .....	52
Ec 1.60 .....	52
Ec 1.61 .....	53
Ec 1.62 .....	53
Ec 1.63 .....	53
Ec 1.64 .....	53
Ec 1.65 .....	53
Ec 1.66 .....	54
Ec 1.67 .....	54
Ec 1.68 .....	54
Ec 1.69 .....	54
Ec 1.70 .....	55
Ec 1.71 .....	55
Ec 1.72 .....	55
Ec 1.73 .....	55
Ec 1.74 .....	55
Ec 3.1 .....	81
Ec 3.2 .....	81
Ec 3.3 .....	83
Ec 3.4 .....	85
Ec 3.5 .....	86
Ec 3.6 .....	86
Ec 3.7 .....	86
Ec 3.8 .....	87
Ec3.9 .....	87
Ec 3.10 .....	87
Ec 3.11 .....	87
Ec 3.12 .....	87
Ec 3.13 .....	87

Ec 3.14 .....	88
Ec 3.15 .....	88
Ec 3.16 .....	88
Ec. 4.1 .....	90
Ec. 4.2 .....	90
Ec. 4.3 .....	91
Ec 4.4 .....	93
Ec 4.5 .....	93
Ec 4.6 .....	94
Ec 4.7 .....	94
Ec 4.8 .....	94
Ec 4.9 .....	97
Ec 4.10 .....	98
Ec 4.11 .....	98
Ec 4.12 .....	99
Ec 4.13 .....	99
Ec 4.14 .....	99
Ec 4.15 .....	99
Ec 4.16 .....	99
Ec 4.17 .....	100
Ec 4.18 .....	100
Ec 4.19 .....	101
Ec 4.20 .....	101
Ec 4.21 .....	102
Ec 4.22 .....	104
Ec 4.23 .....	119
Ec 4.24 .....	120
Ec 4.25 .....	121
Ec 4.26 .....	122
Ec 4.27 .....	122
Ec 4.28 .....	123
Ec 4.29 .....	123
Ec 4.30 .....	123
Ec 4.31 .....	124
Ec 4.32 .....	124
Ec 4.33 .....	124
Ec 4.34 .....	124
Ec 4.35 .....	126
Ec 4.36 .....	126
Ec 4.37 .....	127
Ec 4.38 .....	127
Ec 4.39 .....	127
Ec 4.40 .....	127
Ec 4.41 .....	127
Ec 4.42 .....	127

Ec 4.43 .....	128
Ec 4.44 .....	128
Ec 4.45 .....	128
Ec 4.46 .....	129
Ec 4.47 .....	129
Ec 4.48 .....	129
Ec 4.49 .....	129
Ec 4. 50 .....	129
Ec 4.51 .....	129
Ec 4.52 .....	129
Ec 4.53 .....	129
Ec 4.54 .....	129
Ec 4.55 .....	130
Ec 4.56 .....	130
Ec 4.57 .....	130
Ec 4.58 .....	130
Ec 4.59 .....	130
Ec 4.60 .....	130
Ec 4.61 .....	140
Ec. 4.62 .....	142
Ec 4.63 .....	143
Ec 4.64 .....	143
Ec 4.65 .....	143
Ec 4.66 .....	143
Ec 4.67 .....	143
Ec 4.68 .....	144
Ec 4.69 .....	144
Ec 4.70 .....	144
Ec 4.71 .....	144
Ec 4.61 .....	147
Ec.4.61 .....	197

## **Alcance**

El presente trabajo culminará con el diseño de la cimentación de maquinaria utilizada en la industria petrolera e industria en general, considerando un solo tipo de suelo característico del Ecuador para cada caso.

Determinando que tipo de cimentación es la más adecuada para soportar este tipo de maquinaria de manera segura y funcional, considerando ciertos parámetros que se indican de manera clara en el desarrollo del presente trabajo.

Utilizando la norma ACI 351.3R, Foundations for dynamic equipment como guía teórica de la investigación.

## **Objetivo general.**

Desarrollar una investigación que especifique los parámetros de diseño de una cimentación sujeta a esfuerzos dinámicos para equipo utilizado en la industria petrolera e industrial, considerando un solo tipo de suelo.

## **Objetivos específicos**

- ✓ Determinar el tipo de maquinaria utilizada en campos de explotación petrolera y la industria en general que generen cargas dinámicas y requieran de cimientos característicos.

- ✓ Describir los tipos de estructuras utilizables para cimentar maquinaria que genere esfuerzos dinámicos en la actividad industrial.
- ✓ Desarrollar un modelo de cálculo y un modelo matemático computarizado que describa el diseño de una cimentación que soporte esfuerzos dinámicos.
- ✓ Generar Planos y esquemas para la adecuada construcción de cimentaciones de este tipo.



## **Introducción**

Dentro del campo de la ingeniería civil aplicada a la industria, encontramos un aspecto importante que trata sobre las cimentaciones de maquinaria como equipos mecánicos y maquinaria en general. En todos los sectores productivos como la minería, la siderurgia, el sector petrolero, el sector energético, etc. se requiere utilizar maquinaria pesada con la necesidad de cimentaciones que a más de resistir su peso estático deben ser capaces de soportar todos los esfuerzos dinámicos que estas máquinas generan, que llegan a ser determinantes en ciertos casos específicos.

Las cimentaciones de equipos estáticos pueden ser diseñadas con métodos convencionales, aplicando ingeniería de cimentación convencional, controlando los estados límites de falla y de servicio, conociendo las características físicas propias de cada equipo y determinando las propiedades mecánicas del suelo.

Pero se debe considerar que maquinaria de gran envergadura e importancia, dentro de las industrias antes mencionadas, generan esfuerzos dinámicos producto de su funcionamiento normal, los cuales a su vez generan esfuerzos y deformaciones (vibraciones) que deben ser controladas mediante un diseño adecuado de su cimentación, puesto que una falla de la misma puede llegar a causar problemas al correcto funcionamiento de dicha maquinaria.

El presente trabajo tiene como finalidad, describir los parámetros de diseño para resolver cimentaciones sujetas a cargas dinámicas

El objetivo general del diseño de una cimentación que soporte cargas dinámicas es cumplir con los estados límites de carga y de falla, es decir, que las vibraciones del sistema máquina-cimentación-suelo tengan el comportamiento esperado y especificado en la norma vigente para que tenga un correcto funcionamiento y serviciabilidad, considerando además todas las fuerzas a las que podría estar sujeto el sistema mencionado a lo largo de su vida útil, como cargas estáticas, sísmicas, de temperatura, de viento, etc.

En resumen en la presente disertación se abordarán los siguientes temas:

En el capítulo 1, se determinará los tipos de maquinaria petrolera utilizadas en la industria, sus cargas estáticas así como también los esfuerzos dinámicos que estas producen, considerando los siguientes equipos: compresores, generadores, turbinas, bombas.

En el segundo capítulo se especificará los tipos de cimentaciones utilizados comúnmente para soportar maquinaria de este tipo como lo son cimentaciones en bloque, pilotes o sistemas combinados.

El capítulo 3 considerará las acciones dinámicas a las que estarán sometidas las cimentaciones de maquinaria tales como acciones permanentes, variables y térmicas así como también la carga de para torque normal y cargas dinámicas generadas.

Modelos para el cálculo de cimentaciones de taladros y bombas podrán ser localizados en el capítulo 4, un cálculo manual de cada una de las cimentaciones especificadas

además de modelos matemáticos desarrollados en el programa computarizado para el diseño de estructuras SAP 2000.

El capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas gracias al análisis de resultados y comportamiento de la cimentación.

Todos los esquemas de diseño desarrollados, los planos de cimentaciones completos y tablas finales de resumen se podrán localizar en el último capítulo.

Cabe señalar que todas las ecuaciones que se encuentran especificadas en el presente documento fueron obtenidas de fuentes probadas como los libros *Dynamic Responses of Arbitrarily Shaped Foundations*, *Cimentaciones de Estructuras*, *Análisis Dinámico de Cimentaciones*, *Vibration Analysis and Design of Foundations for Machines and Turbines* así como de los códigos *ACI-Foundations for Dynamic Equipment* y *Código Mexicano de la Construcción* que se encuentran especificadas a detalle en la bibliografía.

## CAPITULO I CONCEPTOS GENERALES

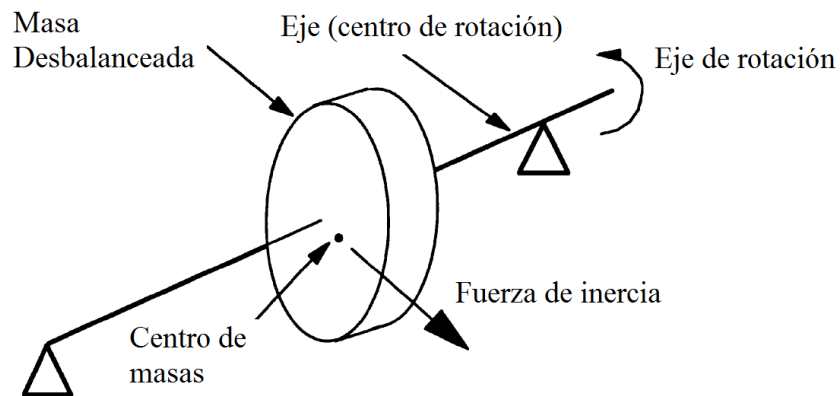
### 1.1 Tipos de maquinaria.

La clasificación del tipo de maquinaria que más interesa al ingeniero civil es en función del tipo de vibraciones que estas pueden producir:

- ✓ Maquinas Centrifugas
- ✓ Maquinas Reciprocantes
- ✓ Máquinas de Impacto

#### *1.1.1 Maquinas centrifugas.*

Su característica principal es que sus partes motrices describen desplazamientos circulares. Su movimiento es continuo, y se produce al desplazar un fluido entre los alabes de una o más ruedas, en ciertas ocasiones este movimiento es producido por la acción de campos magnéticos variables. Este tipo de máquinas usualmente trabajan a elevadas velocidades constantes, que oscilan entre las 3000 y 10000 rpm e incluso pueden sobrepasar este último valor.



**IMAGEN 0.1 - Diagrama de una máquina Centrífuga**  
**Fuente: (ACI Committee, 2004)**

Dentro de este tipo de maquinaria podemos distinguir los siguientes equipos:

#### *1.1.1.1 Bombas y compresores centrífugos.*

En este tipo de máquinas las partes móviles son accionadas por un motor generalmente externo, a su vez dichas partes impulsan un líquido considerado incompresible (agua, aceite, aire, etc.) que circula a presión a través de los alabes y que se desplaza en determinada dirección. Estas máquinas pueden funcionar indistintamente como bombas o turbinas dependiendo el sentido de giro del flujo del fluido.

#### *1.1.1.2 Turbogeneradores.*

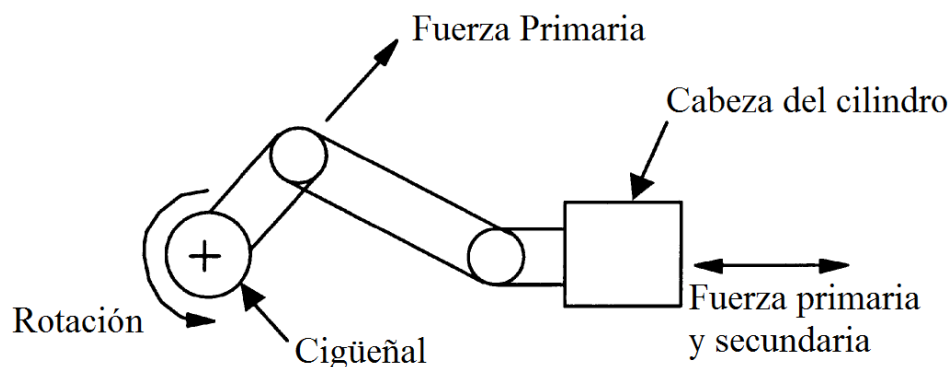
Este tipo de máquinas convierten la energía potencial de un fluido (agua o vapor), que al desplazarse entre los alabes, generan energía mecánica que produce el movimiento de un rotor de un generador eléctrico.

### 1.1.2 Máquinas reciprocantes

Las máquinas reciprocantes funcionan a partir de la expansión violenta de un gas gracias a la acción combinada de émbolos, bielas y manivelas. El émbolo describe un movimiento alternante de tipo armónico o cíclico que se transforma bajo la acción de la biela en un movimiento radial de la manivela.

Las máquinas de combustión interna, máquinas de vapor, compresoras de pistón y todas aquellas que involucren mecanismos de manivela, pertenecen a este grupo de máquinas. Generalmente son mecanismos de baja velocidad que generan velocidades de operación no mayores a las 600 revoluciones por minuto (RPM).

Se debe tener en consideración que en el diseño de cimentación para este tipo de maquinaria se debe contemplar que las fuerzas producidas son desbalanceadas y siguen una variación senoidal o cosenoidal.



*IMAGEN 0.2 - Diagrama de maquina Reciprocante. (ACI Committee, 2004)*

Se puede describir los siguientes tipos:

#### *1.1.2.1 Máquinas de Vapor.*

Generalmente este tipo de equipos está constituido por dos cilindros, que pueden estar en sentido vertical u horizontal. Poseen una caldera que genera vapor que a su vez impulsa el émbolo de cada cilindro.

#### *1.1.2.2 Bombas de embolo.*

Es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, pueden ser de orientación vertical u horizontal o de acción sencilla o doble. Su mecanismo les permite operar a presiones altas.

#### *1.1.2.3 Motores de Diésel y gasolina.*

Generalmente los motores poseen más de tres cilindros, y pueden ser de dos o cuatro tiempos. Su funcionamiento se basa en el impulso producido por la expansión de gases debido a una explosión de una mezcla de combustible y aire. Los motores a base de diésel funcionan a partir del ciclo básico presión – volumen, “Ciclo Diésel”, y los motores de gasolina bajo el “Ciclo de Otto”.

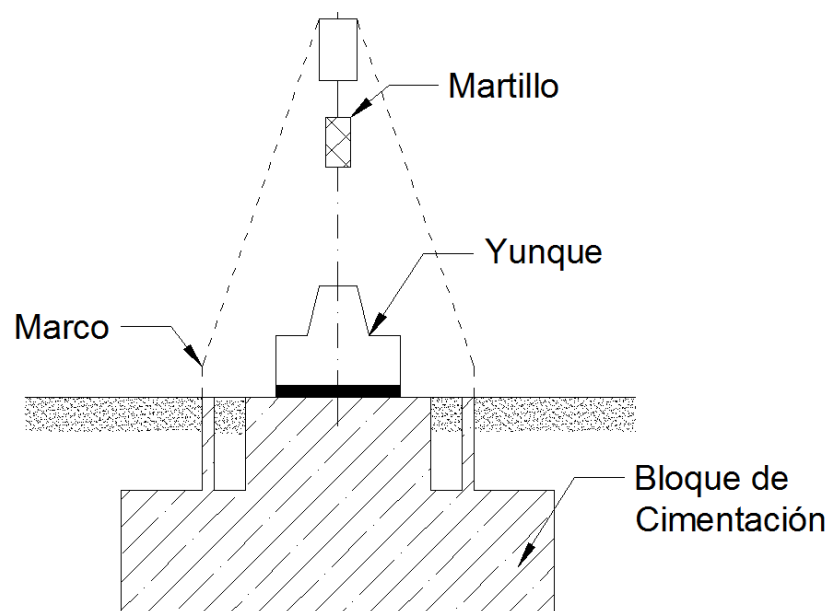
#### *1.1.2.4 Compresores de émbolo.*

Su funcionamiento está dado por el desplazamiento de un émbolo dentro de un cilindro para generar gases a alta presión, constan de uno o varios pasos de compresión.

### ***1.1.3 Máquinas de impacto***

Como su nombre lo indica este tipo de máquinas generan cargas de impacto y pueden ser: cizallas de impacto, máquinas punzadoras, martinets, martillos neumáticos, etc.

La característica principal a considerar en este tipo de maquinaria es que su acción sobre la cimentación, puede considerarse como cargas singulares, ya que su efecto termina antes de que suceda la siguiente carga, lo que provoca vibraciones de tipo transitorias. Es necesario conocer la información de la cantidad de fuerza ejercida y en que lapso de tiempo es aplicada, para poder evaluar la respuesta de la cimentación sujeta a este tipo de esfuerzos.



***IMAGEN 0.3 - Diagrama de Máquina de Impacto. (Hurtado)***



## **1.2 Conceptos de dinámica aplicados a las cimentaciones**

En una cimentación sujeta a cargas dinámicas, ejercidas por maquinaria, las cargas a analizar son de tipo periódicas, que pueden representarse por una función trigonométrica senoidal o cosenoidal. Se debe proponer una cimentación que soporte dichos esfuerzos con seis grados de libertad. Los principales aspectos a considerar son las amplitudes de vibración del sistema y la revisión del fenómeno de resonancia.

Se presentan ciertos conceptos básicos de la física en relación a la teoría de vibraciones:

### ***1.2.1 Vibración.***

Es el movimiento periódico de un cuerpo o sistema que se desplazan desde una posición de equilibrio, es un movimiento que genera grandes frecuencias y puede generar fatiga y falla de materiales. Es importante separar el concepto de vibración del de oscilación ya que las oscilaciones son de una amplitud mayor.

### ***1.2.2 Período.***

Es el intervalo de tiempo que se requiere para completar un ciclo de movimiento y se mide en unidades de tiempo (segundo). Si un movimiento se repite en el mismo intervalo de tiempo a este se le llama movimiento periódico.

$$T = \frac{1}{\text{Frecuencia}} = \frac{1}{f}$$

### ***1.2.3 Movimiento periódico.***

Es aquel movimiento de evolución temporal cuyo estado se repite exactamente en el mismo intervalo de tiempo. El tiempo mínimo necesario para que el estado del sistema se repita se llama período.

### ***1.2.4 Ciclo.***

Se refiere a un movimiento completo ejecutado durante un período.

### ***1.2.5 Frecuencia.***

Es una magnitud que mide el número de ciclos que se dan en un determinado tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

Para calcular la frecuencia se contabilizan un número de ocurrencias de este teniendo en cuenta un intervalo temporal, después estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido.

$$f = \frac{1}{\text{Período}} = \frac{1}{T}$$

### ***1.2.6 Frecuencia natural.***

Es la frecuencia con la que vibra determinado sistema oscilatorio bajo la acción de las fuerzas inherentes al sistema sin la acción de fuerzas externas. Es una frecuencia permanente dentro del sistema cuya magnitud depende del comportamiento propio del sistema. Ciclos por segundo de un sistema lineal en oscilación libre

### ***1.2.7 Vibración forzada.***

Es la vibración que es causada por fuerzas periódicas externas al sistema o a su vez fuerzas intermitentes.

### ***1.2.8 Vibración libre.***

Se define como la oscilación de un sistema, mantenida bajo la acción de fuerzas restauradoras elásticas o gravitacionales únicamente, sin otra fuerza que actúe sobre el mismo. Como ejemplo se puede considerar el movimiento oscilatorio de un péndulo o la vibración de una varilla elástica.

### ***1.2.9 Amplitud de movimiento.***

Es la distancia máxima que alcanza un cuerpo durante las vibraciones desde su posición en reposo. Es una medida de la variación máxima del desplazamiento que varía de forma periódica en el tiempo. Se expresa también como la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

### ***1.2.10 Grados de libertad.***

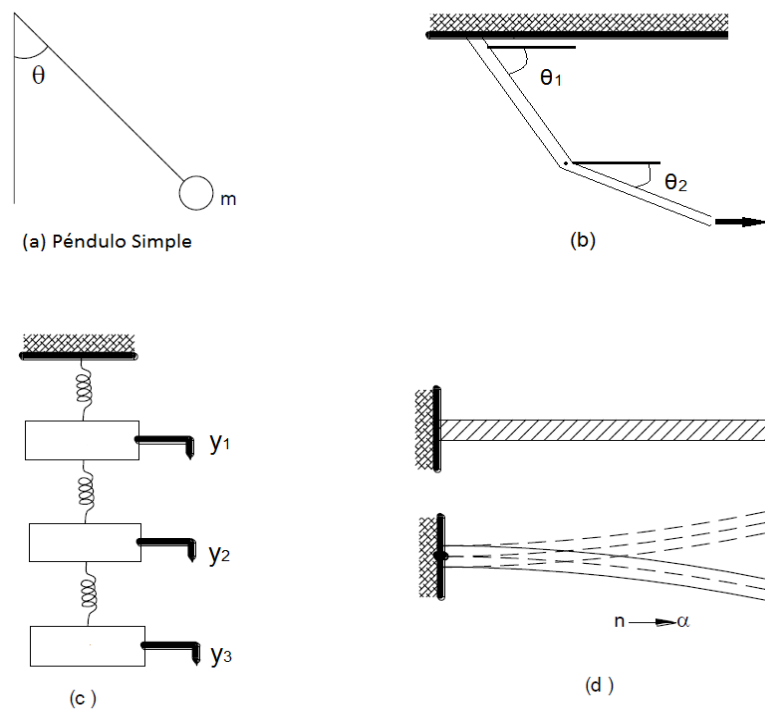
Como concepto físico se expresa como el número de tipos de movimiento que puede tener un objeto, el máximo es seis: tres traslaciones y tres rotaciones. Además nos indica el número de coordenadas independientes necesarias para definir el movimiento de un sistema.

En la IMAGEN 1.7-(a) se muestra un sistema de un grado de libertad ( $n=1$ ) puesto que se define únicamente conociendo el ángulo  $\theta$ .

En la IMAGEN 1.7-(b) se requiere de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  para definir el sistema, por lo que posee dos grados de libertad,  $n=2$ .

En la IMAGEN 1.7-(c) el sistema se define conociendo las variables  $y_1$ ,  $y_2$ , y  $y_3$ . Sistema de 3 grados de libertad,  $n=3$ .

En la IMAGEN 1.7-(d) se requiere un infinito número de ángulos ( $\alpha$ ) para describir la vibración de la barra y así definir el número de grados de libertad del sistema,  $n=\alpha$ .



**IMAGEN 0.4 - Sistemas de Grados de Libertad (Dunham, 1968)**

### **1.2.11 Resonancia.**

Es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a una fuerza periódica cuyo periodo de vibración se asemeja al periodo de vibración natural

de dicho cuerpo. Una fuerza relativamente pequeña aplicada en forma continua hace que una amplitud de un sistema oscilante se haga muy grande.

En estas circunstancias el cuerpo vibra aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento, este efecto puede ser destructivo en algunos materiales rígidos. Si alguna de las frecuencias naturales del sistema (Maquina/cimentación/suelo) coinciden con la frecuencia de excitación de la maquina entonces se dice que se alcanzó una condición de resonancia. Cuando existe resonancia las amplitudes del movimiento son excesivas, de ahí la importancia de calcular las frecuencias naturales del sistema.

#### ***1.2.12 Relación de frecuencias.***

Es la relación entre la frecuencia de la máquina y la frecuencia del sistema (Maquina/cimentación/suelo).

#### ***1.2.13 Modo principal de vibración.***

Un sistema con  $n$  grados de libertad describe una vibración muy compleja en la que la frecuencia y la amplitud no siguen el mismo patrón a cada momento. Dentro de este espectro desordenado de movimientos existe uno especial simple en el que cada punto del sistema vibra con la misma frecuencia, que es similar a una de las frecuencias naturales del sistema; A este movimiento simple se le llama modo principal de vibración.

#### ***1.2.14 Amortiguamiento.***

El amortiguamiento está relacionado a la disipación de energía y absorber la respuesta de un sistema mecánico, se opone a las vibraciones libres de dicho sistema. Si la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad de vibración se denomina amortiguamiento viscoso, si por el contrario, esta fuerza es constante se conoce como amortiguamiento de Coulomb.

### **1.3 Sistemas de un grado de libertad (1GDL)**

Los sistemas de un grado de libertad se definen como aquellos en los que el movimiento está restringido en únicamente una dirección. En la IMAGEN 1.4 se puede identificar un sistema con un grado de libertad compuesto por una masa que podría únicamente describir un movimiento horizontal restringido por un resorte de rigidez  $k$  y una fuerza de amortiguamiento  $C$ .

#### ***1.3.1 Sistemas de 1GDL sujetos a vibración libre.***

La vibración libre se identifica como aquella que se genera sin la injerencia de fuerzas o acciones externas, en el caso de la imagen (), al generar una velocidad inicial, la masa  $m$  puede vibrar únicamente en sentido horizontal, dicho movimiento esta descrito por la ecuación:

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = 0$$

**Ec 0.1**

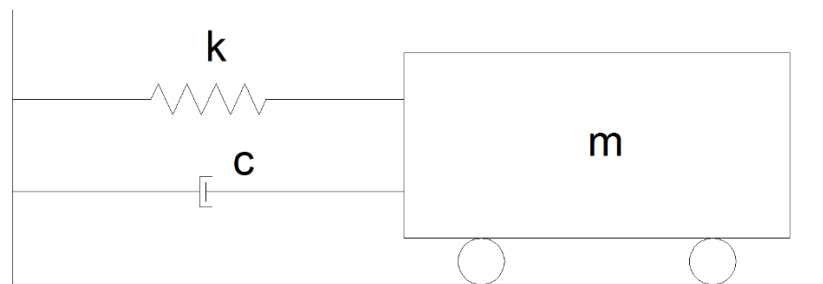
Donde,

$x = \text{Desplazamiento}$

$\dot{x} = \text{Velocidad}$

$\ddot{x} = \text{Aceleración}$

La ecuación esta igualada a cero puesto que no existe ninguna fuerza externa en el sistema.



**IMAGEN 0.5 - Sistema de un grado de libertad (Luca Limaico)**

En la IMAGEN 1.5 “la masa “m” representa las características de masa e inercia de la estructura, el resorte “k” representa la fuerza restauradora y la capacidad de energía de la estructura, el elemento amortiguador “c” indica las pérdidas de energía y las características friccionantes de la estructura.” (Garcés Pout, 1985)

La solución a la ecuación diferencial del movimiento (1.1) se puede expresar como:

$$x = X * e^{-\frac{c}{2m}t} * \sin W_A$$

Ec. 0.2

Donde,

$X = \text{Desplazamiento maximo del movimiento vibratorio.}$

$c = \text{Coeficiente de Amortiguamiento}$

$t = \text{Tiempo}$

$W_A = \text{Frecuencia de oscilación natural con amortiguamiento}$

El desplazamiento máximo (X) está dado por la ecuación (1.3) al considerar las condiciones iniciales del movimiento  $t = 0, x = 0, \dot{x} = V$  y reemplazarlas en la ecuación del movimiento (1.1).

$$X = \frac{V}{\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}} \quad \text{Ec0.3}$$

Para determinar la frecuencia de oscilación natural con amortiguamiento se utiliza la expresión:

$$W_A = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad \text{Ec 0.4}$$

Considerando que el amortiguamiento crítico ( $c_{CR} = 2\sqrt{km}$ ) y el factor de amortiguamiento,  $\xi = \frac{c}{c_c}$ , se obtiene que:

$$W_A = \sqrt{\frac{k}{m} (1 - \xi^2)} \quad \text{Ec. 0.5}$$

$$X = \frac{V}{\sqrt{\frac{k}{m} (1 - \xi^2)}} \quad \text{Ec, 0.6}$$

Las expresiones (1.5) y (1.6) representan la frecuencia natural de vibración y la amplitud libre del movimiento de un sistema amortiguado de 1GDL respectivamente.

En el caso de un sistema no amortiguado las ecuaciones anteriores se reducen a las siguientes expresiones:

$$W_A = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ec 0.7}$$



$$X = \frac{V}{\sqrt{\frac{k}{m}}} \quad \text{Ec 0.8}$$

### *1.3.2 Sistemas de IGD L sujetos a vibración forzada.*

La vibración forzada se define como el movimiento periódico producto de la aplicación de una fuerza externa periódica o intermitente. Por la naturaleza de dicha excitación se pueden definir dos casos de vibración forzada: una fruto de la aplicación de una fuerza constante producto de excitaciones armónicas y una fuerza tipo masa rotatoria resultante de excitaciones arbitrarias.

La presente teoría es aplicable en el diseño de equipo reciproco o rotatorio

#### 1.3.2.1 Fuerza constante - Excitaciones armónicas.

En este tipo de sistemas existen fuerzas o desplazamientos cuyas magnitudes pueden ser representadas por funciones trigonométricas Seno o Coseno, donde existe una fuerza excitadora  $F_o$  constante.

Estas excitaciones se producen usualmente por la acción de maquinaria como turbinas, generadores, bombas, etc.

Su movimiento está caracterizado por la ecuación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \sin \bar{W}t \quad \text{Ec. 0.9}$$

Siendo:

$F_o = \text{Fuerza Excitadora.}$

$\bar{W} = \text{Frecuencia de la fuerza excitadora.}$

La solución de la ecuación (1.9), considerando que el sistema está bajo la acción de una fuerza constante  $F_o$ , con su frecuencia característica  $\bar{W}$ , es:

$$x_p(t) = X \sin(\bar{W} t + \alpha) \quad \text{Ec. 0.10}$$

Reemplazando en la ecuación (1.9) la expresión (1.10), y al obtener la solución para  $X$  y  $\alpha$ , resulta:

$$X = \frac{F_o}{\sqrt{(k - m\bar{W}^2)^2 + (c \bar{W})^2}} \quad \text{Ec 0.11}$$

$$\tan \alpha = \frac{c \bar{W}}{k - m\bar{W}^2} \quad \text{Ec. 0.12}$$

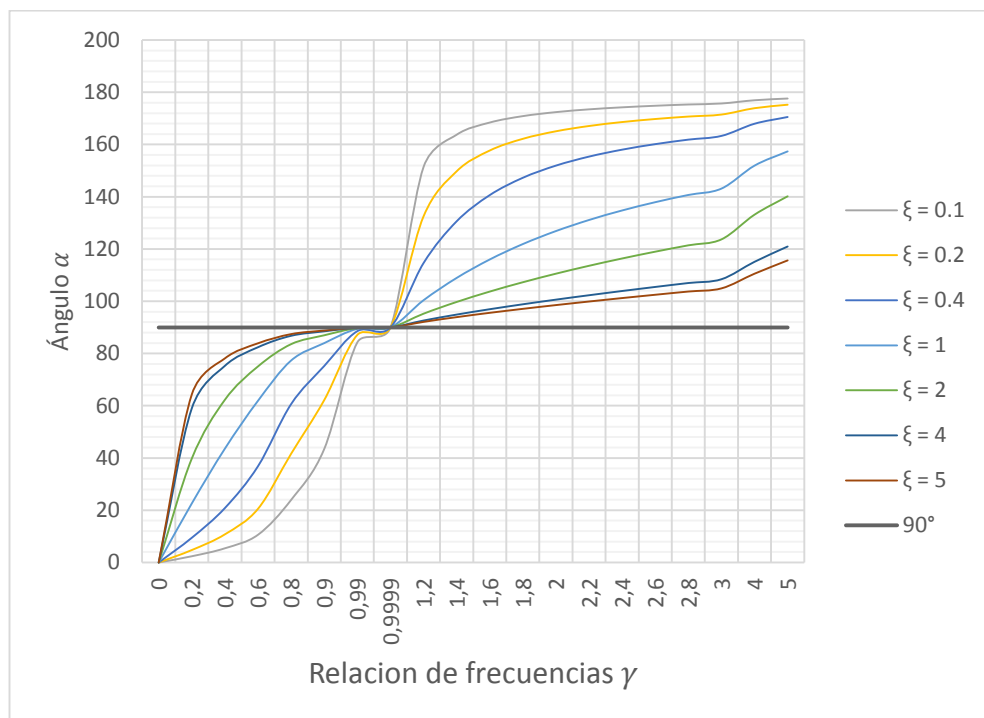
Si se considera que  $W^2 = \frac{k}{m}$ ,  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ ,  $\gamma = \frac{\bar{W}}{W}$  y sustituyendo en las ecuaciones (1.11) y (1.12) estas se expresan como:

$$X = \frac{F_o}{k\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}} \quad \text{Ec. 0.13}$$

$$\tan \alpha = \frac{2\gamma\xi}{1 - \gamma^2} \quad \text{Ec. 0.14}$$

Cabe señalar que se representa la relación entre la frecuencia del equipo y la frecuencia natural de vibración mediante el símbolo  $\gamma$ .

Es posible determinar el valor del ángulo  $\alpha$  utilizando la IMAGEN 1.5 que se encuentra en función de la relación de frecuencias del sistema y del coeficiente de amortiguamiento.



**IMAGEN 0.6 - Ángulo Alfa en función de la relación de frecuencias para diversas cantidades de coeficiente de amortiguamiento.**

Fuente: (Dunham, 1968)

El desplazamiento estático del sistema está definido por la expresión  $X_{st} = \frac{F_0}{k}$ , por lo tanto, la ecuación (1.13) puede escribirse como:

$$X = X_{st} * D$$

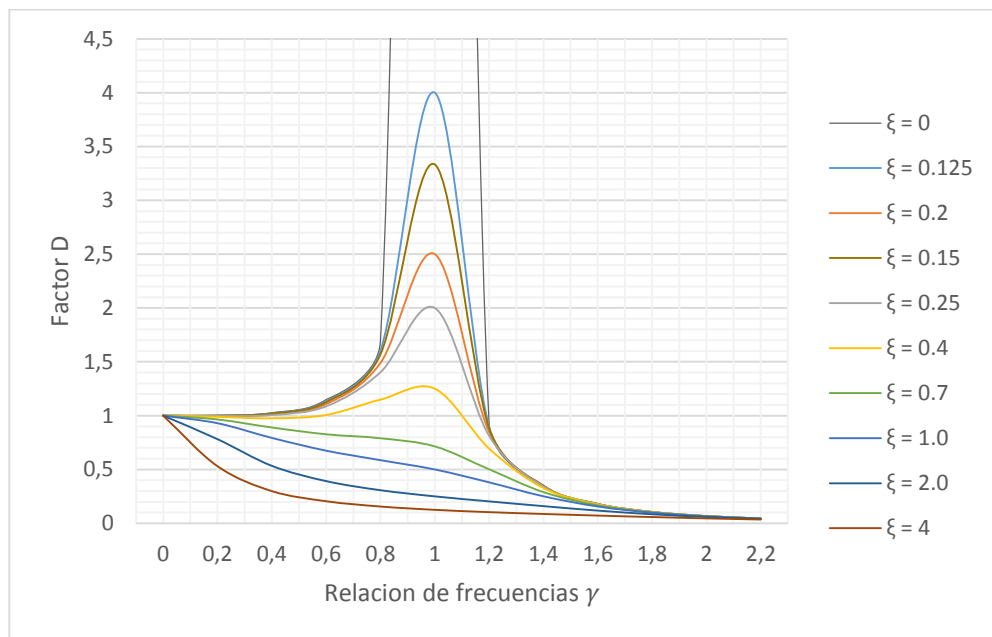
**Ec 0.15**

Donde,

D es el factor de amplificación dinámico y se expresa matemáticamente como:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}} \quad \text{Ec 0.16}$$

A continuación se presenta un gráfico en el que se puede determinar el factor de amplificación D para varios casos de coeficiente de amortiguamiento en función de la relación de frecuencias  $\gamma$ .



**IMAGEN 0.7.- Factor de ampliación dinámico como una función de la relación de frecuencias para diversas cantidades de coeficiente de amortiguamiento.**

Fuente: (Dunham, 1968)

Al analizar la IMAGEN 1.6 es importante señalar que el factor de amplificación dinámico D es máximo cuando la relación de frecuencias  $\gamma$  es igual a 1, es decir, cuando el sistema en análisis se encuentra en resonancia.

Si el sistema completo entra en un estado de resonancia ( $\gamma = 1$ ), y utilizando la ecuación 1.16 se puede expresar el factor de amplificación dinámico como:

$$D = \frac{1}{2\xi} \quad \text{Ec 0.17}$$

### 1.3.2.2 Fuerza tipo masa rotatoria – Excitación arbitraria

Para definir este tipo de vibración se estudia una fuerza  $F$  producida por una masa rotatoria desbalanceada, que se expresa de la siguiente manera:

$$F = (m_e e \bar{W}^2) \sin \bar{W}t \quad \text{Ec 0.18}$$

Donde,  $m_e$  es la masa desbalanceada del sistema, e puede definirse de dos maneras: en el caso de estudiar maquinas reciprocantes se establece como el desplazamiento y en máquinas giratorias representa la excentricidad de la masa desbalanceada,  $\bar{W}$  es la frecuencia del movimiento.

La ecuación (1.18) define el movimiento para un sistema con este tipo de excitación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (m_e e \bar{W}^2) \sin \bar{W}t \quad \text{Ec 0.19}$$

La fuerza de excitación  $F_o$  está delimitada por la expresión:

$$F_o = m_e e \bar{W}^2 \quad \text{Ec 0.20}$$

Al sustituir la expresión (1.20) en la ecuación de la amplitud máxima (1.11), se obtiene que:

$$X = \frac{m_e e \bar{W}^2}{\sqrt{(k - m \bar{W}^2) + (c \bar{W}^2)}} \quad \text{Ec 0.21}$$

Reemplazando  $\bar{W}^2 = \frac{k}{m}$ ,  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ ,  $\gamma = \frac{\bar{W}}{W}$  en la expresión anterior resulta:

$$\frac{X}{\frac{m_e e}{m}} = \gamma^2 \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}} \quad \text{Ec 0.22}$$

Si se considera el factor de amplificación dinámica D definido en la ecuación (1.13) y que la parte izquierda de la igualdad en (1.22) es igual a D` (factor de mayoración) resulta que:

$$D' = \gamma^2 D \quad \text{Ec 0.23}$$

En el caso de que en el sistema no exista amortiguamiento ( $c = 0$ ) o que el coeficiente de amortiguamiento  $\xi$  sea igual a cero, en el caso de una fuerza de excitación constante se obtiene:

$$D = \frac{1}{1 - \gamma^2} \quad \text{Ec 0.24}$$

O para un sistema de masa giratoria:

$$D = \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2} \quad \text{Ec 0.25}$$

Si se tiene que la relación de frecuencias  $\gamma$  es igual a la unidad y los factores de amplificación y mayoración D y D` respectivamente tienden al infinito el sistema en estudio se encuentra en resonancia. Por lo que evidentemente al considerar los efectos de este fenómeno descritos en la sección 1.2.11 del presente documento, se debe evitar que  $\gamma$  sea semejante a uno.

El rango en el que debe encontrarse el valor de la relación de frecuencias está dado por el “Code of Practice for Design and Construction of Machine Foundations - Part I: Foundation for Reciprocating Type Machines” (Código Práctico para el diseño y construcción de cimentaciones para máquinas- Parte I: Cimentación para equipo recíproco).

$$1.5 > \gamma, \quad \gamma < 0.4$$

**Ec 0.26**

Existen expresiones que definen la frecuencia de resonancia y las amplitudes para un sistema como los descritos anteriormente y se presentan en la siguiente tabla:

	Fuerza de Excitación	Frecuencia de Resonancia	Amplitud	Amplitud máxima de Vibración
Excitación Armónica	$F_o = Cste.$	$fn\sqrt{1 - 2\xi^2}$	$\frac{F_o}{k} \sqrt{\frac{1}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}}$	$\frac{F_o}{k} * \frac{1}{2\xi} * \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}}$
Excitación Arbitraria	$F_o = m_e e \bar{W}^2$	$fn \frac{1}{\sqrt{1 - 2\xi^2}}$	$\frac{m_e e \gamma^2}{m} \sqrt{\frac{1}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}}$	$\frac{m_e e}{m} * \frac{1}{2\xi \sqrt{1 - \xi^2}}$

**TABLA 0.1 - Relaciones para un sistema de un grado de libertad.**

Donde:

$$fn: \text{Frecuencia Natural}; \quad fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi: \text{Coeficiente de Amortiguamiento}; \quad \xi = \frac{c}{c_{CR}} > 1.00$$

$$c_{CR}: \text{Amortiguamiento Crítico}; \quad c_{CR} = 2\xi\sqrt{km}$$

### 1.3.3 Fuerza transmitida a la cimentación.

El grado de aislamiento relativo en una cimentación se conoce como transmisibilidad, en otras palabras se identifica como la fuerza transmitida a la cimentación de un sistema estructural producto de los esfuerzos generados en la superestructura, se define de dos maneras:

- Como la relación entre la amplitud del movimiento  $X$  y la amplitud del movimiento del sustento  $X_s$ .

$$T_R = \frac{X}{X_s}$$

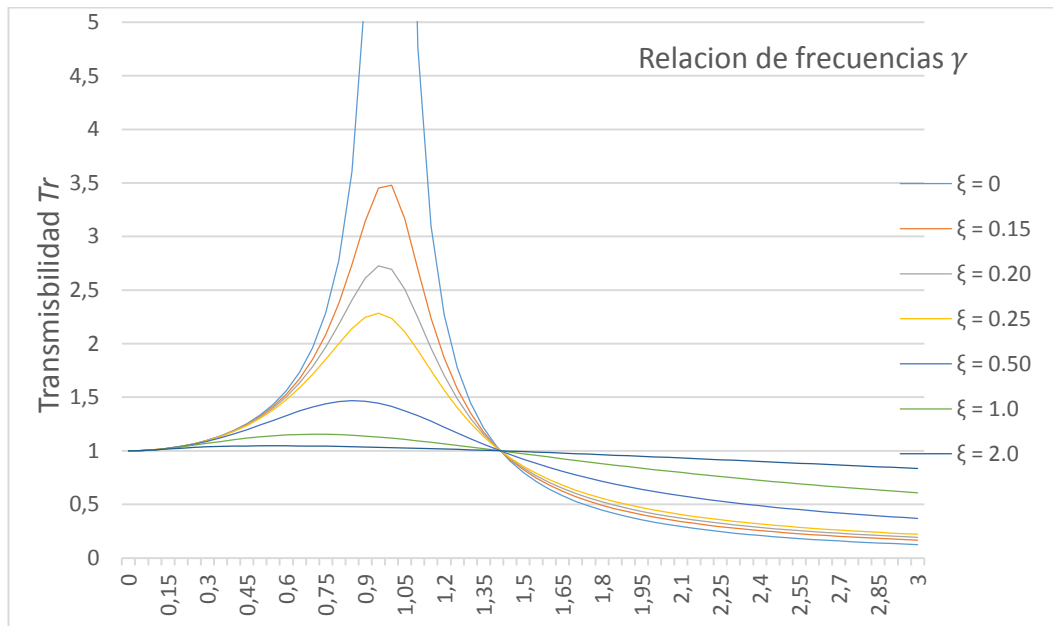
- La razón entre la amplitud de la fuerza transmitida al cimiento y la amplitud de la fuerza aplicada.

$$T_R = \frac{A_T}{F_o}$$

Independientemente de la definición que se prefiera, la ecuación que define la transmisibilidad resulta la misma:

$$T_R = \sqrt{\frac{1 + (2\gamma\xi)^2}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\gamma\xi)^2}} \quad \text{Ec 0.27}$$





**IMAGEN 0.8 - Transmisibilidad versus la relación de frecuencias para diferentes valores de amortiguamiento.**

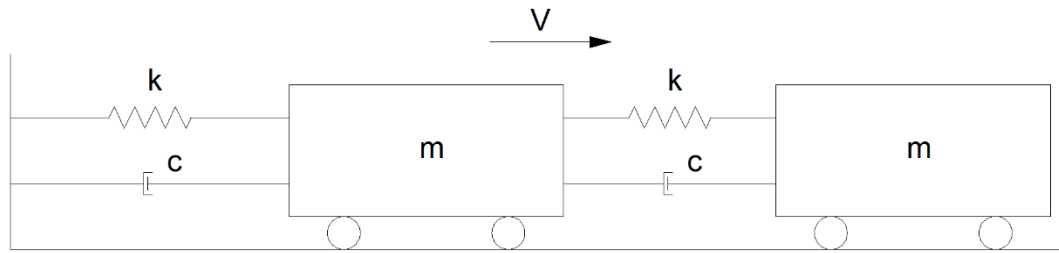
**Fuente (Dunham, 1968)**

La IMAGEN 1.8 expresa de manera gráfica los valores que puede alcanzar la fuerza de transmisibilidad.

#### **1.4 Sistemas de dos grados de libertad (2GDL)**

Considerando la IMAGEN 1.8, y al recordar el concepto de sistemas con un grado de libertad que se encuentra en la sección 1.3, no resulta complicado comprender la naturaleza del movimiento de este tipo de sistemas. Pero si es importante señalar que poseen ciertas características únicas, este tipo de sistemas poseen dos frecuencias naturales y consecuentemente dos frecuencias de excitación diferentes en las que se genera el fenómeno de resonancia.

Es importante señalar, que solo para dos tipos de excitaciones específicas el sistema es armónico, y que generalmente estas dos perturbaciones no poseen frecuencias coincidentes.



**IMAGEN 0.9 - Sistemas de dos grados de libertad. (Luca Limaico)**

#### **1.4.1** *Sistemas de 2GDL sujetos a vibración libre.*

##### 1.4.1.1 Caso no amortiguado.

Este tipo de sistemas puede ser representado mediante el modelo matemático de la IMAGEN 1.8 sin considerar los amortiguadores  $c$ . El sistema empieza a vibrar libremente cuando se le aplica una velocidad inicial o un desplazamiento a una de sus masas, las ecuaciones diferenciales que expresan este movimiento de todo el sistema son:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = 0 \quad \text{Ec 0.28}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_1 - x_2) = 0 \quad \text{Ec 0.29}$$

Se puede definir las frecuencias límites del sistema expresadas como:

$$\bar{\omega}_1 = \frac{k_1}{m_1 + m_2} \quad \text{Ec 0.30}$$

$$\bar{w}_2 = \frac{k_2}{m_2} \quad \text{Ec 0.31}$$

La expresión para las frecuencias circulares naturales del sistema es:

$$f(W^2) = W^4 - (\bar{W}_1^2 - \bar{W}_2^2)(1 + \alpha)W^2 + (1 + \alpha)\bar{W}_1^2 * \bar{W}_2^2 = 0 \quad \text{Ec 0.32}$$

Donde,

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1} \quad \text{Ec 0.33}$$

$\bar{W}_1$  es la frecuencia del sistema cuando la rigidez del resorte  $k_2$  se asume infinita, es decir, se considera a este como rígido.  $\bar{W}_2$  es la frecuencia del sistema cuando  $k_1$  se toma como infinita.

Considerando las expresiones (1.30) y (1.31) la ecuación de las frecuencias circulares naturales (1.32) es:

$$\left(\frac{W}{\bar{W}_2}\right)^4 - \left(\frac{W}{\bar{W}_2}\right)^2 \left(\frac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{\beta}\right) + \frac{\alpha}{\beta} = 0 \quad \text{Ec 0.34}$$

En la cual,

$$\beta = \frac{k_2}{k_1} \quad \text{Ec 0.35}$$

El movimiento de las masas es libre ante una excitación y se representa como:

$$x_1 = A_1 \sin W_1 t + A_2 \sin W_2 t \quad \text{Ec 0.36}$$

$$x_2 = B_1 \sin W_1 t + B_2 \sin W_2 t \quad \text{Ec 0.37}$$

Al igual que en casos anteriores, para determinar las amplitudes de los movimientos se utiliza las condiciones iniciales del sistema considerando que se le da una velocidad inicial únicamente a la masa más alejada a la base del resorte, las condiciones iniciales son:

$$t = 0$$

$$x_1 = x_2 = 0$$

$$\dot{x}_1 = 0 \quad ; \quad \ddot{x}_2 = V$$

Al reemplazarlas en las ecuaciones de los desplazamientos  $x_1$  y  $x_2$  se obtiene:

$$x_1 = \frac{(\bar{W}_2^2 - W_2^2)(\bar{W}_2^2 - W_1^2)}{\bar{W}_2^2(W_1^2 - W_2^2)} * V \left\{ \frac{\sin W_2 t}{\bar{W}_1} - \frac{\sin W_2 t}{\bar{W}_2} \right\} \quad \text{Ec 0.38}$$

$$x_2 = \frac{V}{(W_1^2 - W_2^2)} \left\{ \frac{\bar{W}_2^2 - W_2^2}{W_1} \sin W_1 t - \frac{\bar{W}_2^2 - W_1^2}{W_2} \sin W_2 t \right\} \quad \text{Ec 0.39}$$

Si se determina que  $W_1 > W_2$  , entonces la sección aportada por esta frecuencia se desprecia en la ecuación. Las amplitudes  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  se expresan así:

$$X_1 = - \frac{(\bar{W}_2^2 - W_2^2)(\bar{W}_2^2 - W_1^2)}{\bar{W}_2^2(W_1^2 - W_2^2)} * \frac{V}{W_2} \quad \text{Ec. 0.40}$$

$$X_2 = - \frac{(\bar{W}_2^2 - W_1^2)}{(W_1^2 - W_2^2)} * \frac{V}{W_2} \quad \text{Ec. 0.41}$$

#### 1.4.1.2 Caso amortiguado.

Es preciso mencionar que a nivel práctico es difícil determinar los valores de los coeficientes de amortiguamiento de un sistema y por lo tanto, estos son despreciados por su poca influencia; pero si se tratara el caso en el que no fuera posible su omisión y sus magnitudes sean determinables es recomendable incluir estos parámetros de manera teórica en el diseño.

Considerando la IMAGEN 1.8 y al observar que este sistema posee amortiguadores de tipo viscosos con coeficientes  $c_1$  y  $c_2$ , las ecuaciones que describen el movimiento de dicho sistema son:

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \quad \text{Ec 0.42}$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad \text{Ec 0.43}$$

Tanto  $x_1$  como  $x_2$  son funciones armónicas y pueden ser catalogadas como vectores, por lo tanto, se los puede escribir como números complejos, y al sustituirlos se obtiene:

$$x_1 = X_1 e^{iWt} \quad \text{Ec 0.44}$$

$$x_2 = X_2 e^{iWt} \quad \text{Ec 0.45}$$

Al resolver las ecuaciones (1.45) y (1.46) se obtiene una expresión gobernante que describe las frecuencias naturales del sistema:

$$\{F(W^2)\}^2 = 4W^2 \left\{ \xi_1 \bar{W}_1 \left( \bar{W}_2^2 - W^2 \right) \sqrt{(1 + \alpha)} + \xi_2 \bar{W}_2 \left( \bar{W}_1^2 - W^2 \right) (1 + \alpha) \right\}^2 \quad \text{Ec 0.46}$$

Donde,

$$F(W^2) = W^4 - W^2(1 + \alpha) \left( \bar{W}_1^2 + \bar{W}_2^2 + 4\xi_1\xi_2\bar{W}_1\bar{W}_2\sqrt{(1 + \alpha)} + \bar{W}_1^2\bar{W}_2^2(1 + \alpha) \right) \quad \text{Ec 0.47}$$

Para la ecuación (1.47) se establece que  $\bar{W}_1$ ,  $\bar{W}_2$  y  $\alpha$ , están definidas por las expresiones (1.30), (1.31) y (1.33) respectivamente.

Los coeficientes de amortiguamiento  $\xi_1$  y  $\xi_2$  se establecen en las ecuaciones (1.48) y (1.49).

$$\frac{c_1}{m_1} = 2\xi_1 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad \text{Ec. 0.48}$$

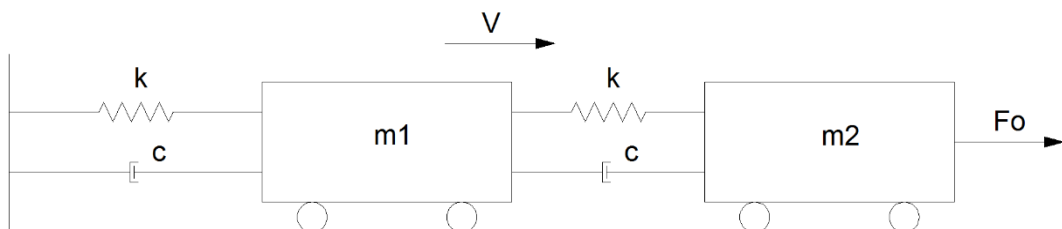
$$\frac{c_2}{m_2} = 2\xi_2 \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad \text{Ec. 0.49}$$

Sí,  $\xi_1 = 0$  y  $\xi_2 = 0$ , la ecuación para las frecuencias naturales del sistema (1.48) se simplifica a la expresión establecida como (1.32).

#### 1.4.2 Sistemas de 2GDL sujetos a vibración forzada.

##### 1.4.2.1 Caso no Amortiguado.

##### Caso 1.- Fuerza de excitación únicamente sobre la masa $m_2$ .



**IMAGEN 0.10 - Sistemas de dos grados de libertad con fuerza de excitación (Luca Limaico)**

Al observar la IMAGEN 1.9 y considerando una fuerza de excitación oscilante ( $F_o \sin Wt$ ) sobre la masa  $m_2$ , en la cual se conoce que  $F_o$  es la fuerza máxima externa y  $W$  es la frecuencia de operación del equipo, las ecuaciones diferenciales que caracterizan el movimiento este sistema son:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = 0 \quad \text{Ec 0.50}$$

$$m_1 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = F_o \sin Wt \quad \text{Ec 0.51}$$

Las amplitudes de los movimientos de las masas son:

$$X_1 = \frac{\bar{W}_2^2}{m_1 f(W^2)} F_o \quad \text{Ec 0.52}$$

$$X_2 = \frac{[(1 + \alpha) \bar{W}_1^2 + \alpha \bar{W}_2^2 - W^2]}{m_2 (W^2)} \quad \text{Ec 0.53}$$

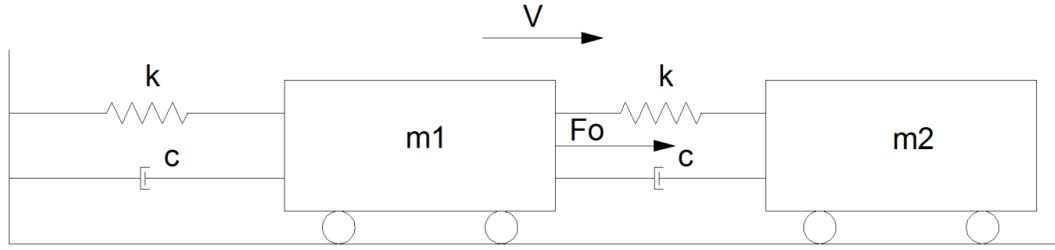
En las ecuaciones (1.30), (1.31) y (1.32) se establecen  $\bar{W}_1$ ,  $\bar{W}_2$  y  $\alpha$ .

$$\begin{aligned} f(W^2) &= W^4 - (\bar{W}_1^2 + \bar{W}_2^2) (1 + \alpha) W^2 + (1 + \alpha) * \bar{W}_1^2 * \bar{W}_2^2 \\ &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec 0.54}$$

La ecuación (1.54) refleja la frecuencia natural del sistema.

Este caso de estudio resulta útil para el análisis de cimentaciones de tipo bloque sobre amortiguadores.

Caso 2.- Fuerza de excitación únicamente sobre la masa  $m_1$ .



**IMAGEN 0.11 - Sistemas de dos grados de libertad con fuerza de excitación (Luca Limaico)**

Considerando la IMAGEN 1.11, a la masa  $m_1$  se le aplica la fuerza de excitación  $F_o \sin Wt$  con las mismas características que para el caso 1. Las ecuaciones del movimiento para este sistema son:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_o \sin Wt \quad \text{Ec 0.55}$$

$$m_1 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad \text{Ec 0.56}$$

Se definen las amplitudes de los movimientos como:

$$X_1 = \frac{F_o}{m_1 f(W^2)} (\bar{W}_2^2 - W^2) \quad \text{Ec 0.57}$$

$$X_2 = \frac{F_o}{m_1 f(W^2)} \bar{W}_2^2 \quad \text{Ec 0.58}$$

Las ecuaciones anteriores (1.57) y (1.58), pueden ser representados para factores dinámicos así:

$$D_1 = \frac{|X_1|}{X_{ST}} = \frac{\gamma_2^2 (\gamma_1^2 - \gamma_1^2 \gamma_2^2)}{(\gamma_1^2 - \gamma_1^2 \gamma_2^2) (\gamma_2^2 + \gamma_1^2 \alpha - \gamma_1^2 \gamma_2^2) - \gamma_1^4 \alpha} \quad \text{Ec 0.59}$$

$$D_2 = \frac{|X_2|}{X_{ST}} = \frac{\gamma_1^2 \gamma_2^2}{(\gamma_1^2 - \gamma_1^2 \gamma_2^2) (\gamma_2^2 + \gamma_1^2 \alpha - \gamma_1^2 \gamma_2^2) - \gamma_1^4 \alpha} \quad \text{Ec 0.60}$$

En las que:



$$X_{ST} = \frac{F_o}{k_1}$$

$$\gamma_1 = \frac{W_1}{\sqrt{\frac{k_1}{m_1}}}$$

$$\gamma_1 = \frac{W_2}{\sqrt{\frac{k_2}{m_2}}}$$

1.4.2.2 Caso Amortiguado.

Caso 1.- La fuerza de excitación armónica  $F_o \sin Wt$  actua solo en la masa  $m_1$  imagen

1.10

Las ecuaciones diferenciales que describen este tipo de movimiento son:

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_1 \dot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_o \sin Wt \quad \text{Ec 0.61}$$

$$m_1 \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) = 0 \quad \text{Ec 0.62}$$

Las soluciones planteadas para las ecuaciones diferenciales son:

$$x_1 = X_1 e^{iWt} \quad \text{Ec 0.63}$$

$$x_2 = X_2 e^{iWt} \quad \text{Ec 0.64}$$

Al sustituir en las ecuaciones del movimiento (1.61) y (1.62) las soluciones (1.63) y (1.64), se obtienen las siguientes relaciones:

$$X_1 = \frac{F_o}{m_1} \left[ \frac{(\bar{W}_2^2 - W^2) + 2i\xi_1 \bar{W}_2 W}{F(W^2) + 2iW \left\{ \xi_1 \bar{W}_1 (\bar{W}_2^2 - W^2) \right\} \sqrt{(1 + \alpha)} + \xi_2 \bar{W}_2 (\bar{W}_1^2 - W^2) (1 + \alpha)} \right]$$

Ec 0.65

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + c_2 iW)}{k_2 - m_2 W^2 + c_2 iW} \quad \text{Ec 0.66}$$

Para la ecuación (1.65) el valor de  $F(W^2)$  esta especificado en la ecuación (1.47).

Para determinar las expresiones de  $X_1$  y  $X_2$  se utiliza principios de algebra compleja y se obtiene:

$$X_1 = \frac{F_o}{m_1} \sqrt{\frac{(\bar{W}_2^4 - W^2)^2 + 4\xi_2^2 \bar{W}_2^2 W^2}{\{F(W^2)\}^2 + 4W^2 \left\{ \xi_1 \bar{W}_1 (\bar{W}_2^2 - W^2) \sqrt{(1+\alpha)} + \xi_2 \bar{W}_2 (\bar{W}_1^2 - W^2) (1+\alpha) \right\}^2}} \quad \text{Ec 0.67}$$

$$X_2 = \frac{F_o}{m_1} \sqrt{\frac{W_2^4 + 4\xi_2^2 \bar{W}_2^2 W^2}{\{F(W^2)\}^2 + 4W^2 \left\{ \xi_1 \bar{W}_1 (\bar{W}_2^2 - W^2) \sqrt{(1+\alpha)} + \xi_2 \bar{W}_2 (\bar{W}_1^2 - W^2) (1+\alpha) \right\}^2}} \quad \text{Ec 0.68}$$

#### Caso Particular.-

Se propone este caso si se da que el coeficiente de amortiguamiento es despreciable ( $\xi_1 = 0$ ) y  $\xi_2 = \xi$ .

Con las condiciones mencionadas y con una fuerza de excitación  $F_o \sin Wt$  la ecuación para calcular la amplitud del movimiento de la masa  $m_1$  es:

$$X_1 = \frac{F_o}{m_1} \sqrt{\frac{(\bar{W}_2^2 - W^2)^2 + 4\xi^2 \bar{W}_2^2 W^2}{\{F(W^2)\}^2 + 4W^2 \xi^2 \bar{W}_2^2 \left\{ (1+\alpha)^2 (\bar{W}_1^2 - W^2)^2 \right\}}} \quad \text{Ec 0.69}$$

$$X_2 = \frac{F_o}{m_1} \sqrt{\frac{\bar{W}_2^4 + 4\xi^2 \bar{W}_2^2 W^2}{\{F(W^2)\}^2 + 4W^2 \xi^2 \bar{W}_2^2 \left\{(1 + \alpha)^2 (\bar{W}_1^2 - W^2)^2\right\}}} \quad \text{Ec 0.70}$$

Al igual que en el caso 1 al reemplazar el valor de  $F(W^2)$  dado en la ecuación (1.47) obtenemos: obtenemos:

$$X_1 = F_o \sqrt{\frac{(k_2 - m_2 W^2)^2 + c_2 W^2}{\{(k_1 - m_1 W^2)(k_2 - m_2 W^2) - k_2 m_2 W^2\}^2 + c^2 W^2 \{k_1 - m_1 W^2 - m_2 W^2\}^2}} \quad \text{Ec 0.71}$$

$$X_2 = F_o \sqrt{\frac{k_2^2 + c_2 W^2}{\{(k_1 - m_1 W^2)(k_2 - m_2 W^2) - k_2 m_2 W^2\}^2 + c^2 W^2 \{k_1 - m_1 W^2 - m_2 W^2\}^2}} \quad \text{Ec 0.72}$$

Al expresar las ecuaciones (1.71) y (1.72) de forma adimensional resultan en:

$$D_1 = \frac{|X_1|}{X_{ST}} = \sqrt{\frac{(1 - \gamma_2^2) + 4\xi^2 \gamma_2^2}{[\alpha \gamma_1^2 - (\gamma_1^2 - 1)(\gamma_2^2 - 1)]^2 + 4\xi^2 \gamma_2^2 (\gamma_1^2 - 1 + \alpha \gamma_1^2)^2}} \quad \text{Ec 0.73}$$

$$D_2 = \frac{|X_2|}{X_{ST}} = \sqrt{\frac{1 + 4\xi^2 \gamma_2^2}{[\alpha \gamma_1^2 - (\gamma_1^2 - 1)(\gamma_2^2 - 1)]^2 + 4\xi^2 \gamma_2^2 (\gamma_1^2 - 1 + \alpha \gamma_1^2)^2}} \quad \text{Ec 0.74}$$

Donde,

$$X_{ST} = \frac{F_o}{k_1}$$

$$\gamma_1 = \frac{W_1}{\sqrt{\frac{k_1}{m_1}}}$$

$$\gamma_1 = \frac{W_2}{\sqrt{\frac{k_2}{m_2}}}$$

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1}$$

$$\delta = \frac{c}{c_{CR}}$$

### **1.5 Criterios de diseño de cimentaciones para maquinarias**

En función de la normativa vigente, todas las cimentaciones de estructuras deben cumplir estrictamente con los estados límites de falla (Capacidad de carga, volteo, deslizamiento) y además con los estados límites de servicio, es decir, desplazamientos, asentamientos, deformaciones, vibraciones.

Por la naturaleza rotatoria del funcionamiento de maquinaria, esta produce en el sistema cimentación-suelo vibraciones que en ocasiones pueden producir daños al funcionamiento de la maquinaria, pueden causar molestias en el personal que labora cerca de dicho lugar o generar problemas en estructuras aledañas. Por lo que el principal objetivo del diseño dinámico de una cimentación es evitar que se produzcan cualquiera de los inconvenientes mencionados.

Es importante considerar, al momento de proyectar una cimentación para maquinaria, la funcionalidad de esta, es decir, considerar toda la serviciabilidad que la cimentación debe prestar tanto para el proceso del montaje como para la puesta en funcionamiento

de la maquinaria, tomando en cuenta también el equipo de apoyo necesario para este proceso (generalmente grúas). Se debe considerar además, el desmontaje parcial o total del equipo en futuras reparaciones.

Las cimentaciones sujetas a vibraciones y que deben soportar varios tipos de máquinas deben ser propuestas como un elemento completo, es decir, que soporte todas las máquinas del conjunto, y además deben ser lo suficientemente rígidas y fuertes para únicamente soportar asentamientos similares en toda la cimentación, que no dañen los elementos entre máquinas como ejes de rotación, tuberías, etc. La cimentación debe poseer el empotramiento necesario para desarrollar la sustentación vertical y horizontal suficiente, considerando que para este efecto la cimentación funciona también como pedestal de los equipos.

Este tipo de cimentaciones al ser de hormigón armado poseen acabados bastante rústicos, por lo que el montaje de maquinaria sobre ellas (considerando pernos de anclaje y demás dispositivos) no siempre es preciso, por lo que es responsabilidad del ingeniero diseñador prever el proceso de instalación y anclaje de la maquinaria desarrollando mecanismos y dispositivos de sujeción capaces de modificarse sobre la marcha.

Es recomendable aislar las cimentaciones de maquinaria, de las losas de piso con rellenos adecuados y juntas funcionales, para evitar la transmisión de vibraciones a estructuras que no soportaran dichos esfuerzos y presentarán problemas de agrietamiento y serviciabilidad.

Además es importante tomar en cuenta que no se debe utilizar pedestales estrechos para cimentar equipos, pues generan problemas debido al volcamiento probable, además generan conflictos de alineación con otros dispositivos del sistema, asentamientos diferenciales, vibraciones fuera de fase, etc.

Límites de falla y de servicio que deben cumplir las cimentaciones de maquinaria para su correcto funcionamiento y serviciabilidad:

#### ***1.5.1 Límites de falla del suelo.***

El límite de falla del suelo, en la mecánica de suelos moderna gracias a la teoría de Mohr-Coulomb, puede establecerse gracias a su resistencia al corte, por lo tanto se busca que los esfuerzos dinámicos y estáticos de la cimentación y la maquinaria en funcionamiento, no superen la capacidad al corte del suelo. Se debe considerar los códigos de diseño vigentes para realizar esta comprobación.

#### ***1.5.2 Límites de falla de la cimentación.***

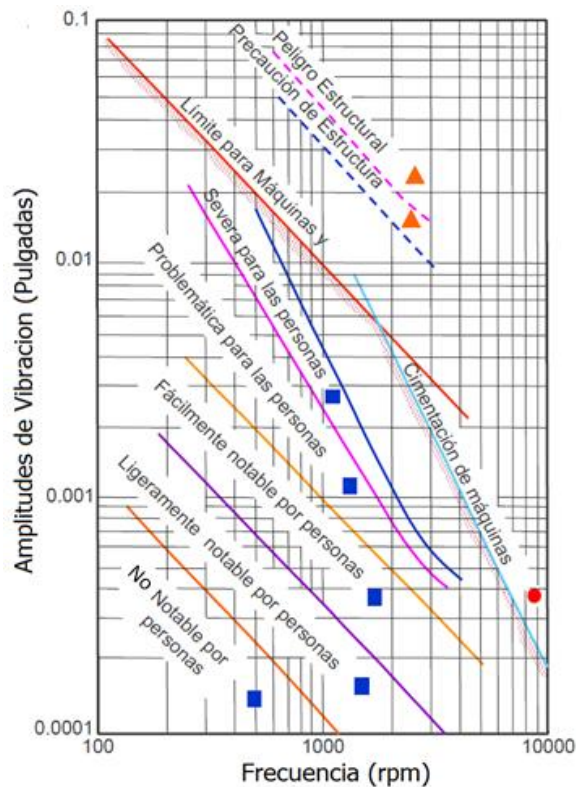
Los límites de falla que se pueden definir en la cimentación son: flexión, cortante y torsión. Que deben ser delimitados bajo la normativa vigente para que no sobrepasen los valores máximos bajo la acción estática y dinámica del sistema (maquinaria – cimentación)

### ***1.5.3 Límite de servicio por la vibración de la maquinaria.***

Al considerar el límite de servicio por la vibración de la maquinaria se debe tomar en cuenta que si bien es cierto toda maquinaria genera movimientos en su correcto funcionamiento, si este es excesivo puede ocasionar problemas en su propia operación. Se pueden producir desgastes prematuros y diferenciales en partes importantes del equipo, que conlleven a mantenimientos excesivos y en los peores casos a la disminución de la vida útil del mismo.

El fabricante debe definir los movimientos máximos aceptables en el equipo y este parámetro debe ser considerado obligatoriamente en la proyección de su cimentación.

Debe contemplarse además la percepción de la vibración de la maquinaria en las personas que laboran cerca de ella; para esta determinación se ha creado un gráfico donde se pueden identificar los niveles de percepción de las vibraciones para el ser humano, en función de la amplitud y la frecuencia del movimiento. De la misma manera se puede observar curvas que limitan el efecto de las vibraciones sobre la maquinaria y los cimientos.



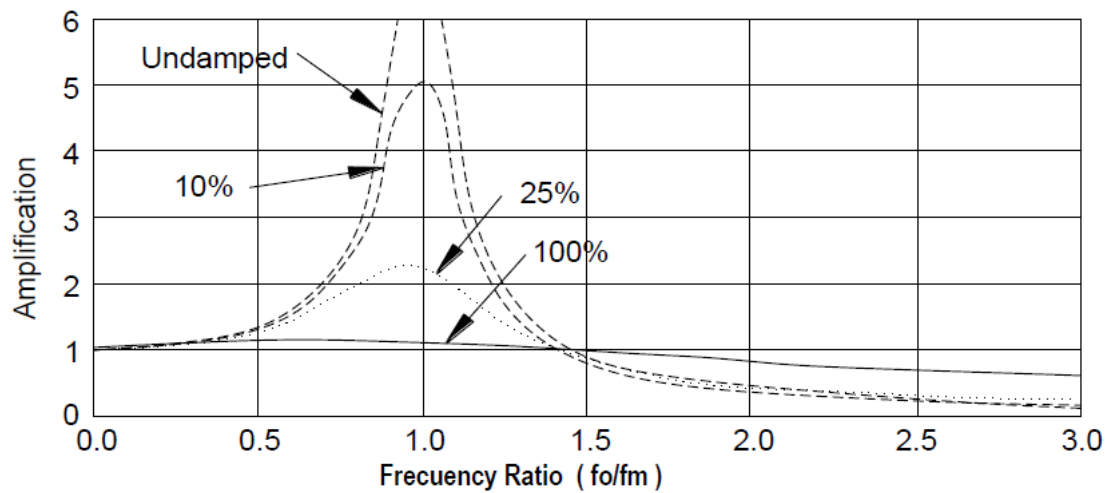
**IMAGEN 0.12 - Límites de amplitud del desplazamiento en función de la frecuencia.**  
**Fuente: (ACI Committee, 2004)**

#### **1.5.4 Límite por resonancia.**

Considerando la definición de resonancia expresada en este documento en la sección CONCEPTOS DE DINÁMICA APLICADOS A LAS CIMENTACIONES, se determina que se debe evitar este fenómeno dentro del conjunto máquina-cimentación-suelo, por todos los problemas que este traería.

Al obtener la relación de frecuencias en el sistema estructural (máquina-cimentación-suelo), si esta es igual a la unidad, se dice que el sistema se encuentra en resonancia, como se ilustra en el siguiente gráfico:





**IMAGEN 0.13 - Fenómeno de resonancia. Relación de frecuencia de la maquina a la frecuencia del sistema máquina-cimentación-suelo.**  
**Fuente (ACI Committee, 2004)**

Es muy importante realizar la revisión de la existencia de resonancia dentro del diseño dinámico de una cimentación.

#### **1.5.5 Límite por transmisión de vibraciones.**

Este parámetro tiene por objeto limitar por completo el efecto de las vibraciones producidas por el sistema estructural que se está diseñando, en estructuras vecinas o en maquinaria aledaña para evitar daños y afectaciones.

### **1.6 Propiedades a considerar en el diseño de una cimentación.**

#### **1.6.1 Asentamientos.**

Es evidente que se deben controlar hasta el más mínimo asentamiento en este tipo de cimientos provocados por sobrecargas, choques o fuerzas de impulsión.

Una práctica recomendada para el diseño de estos apoyos es utilizar un factor de seguridad sobre la carga, mayor al acostumbrado en estructuras comunes, es decir, utilizar un porcentaje menor de la magnitud de la carga actuante sobre la cimentación.

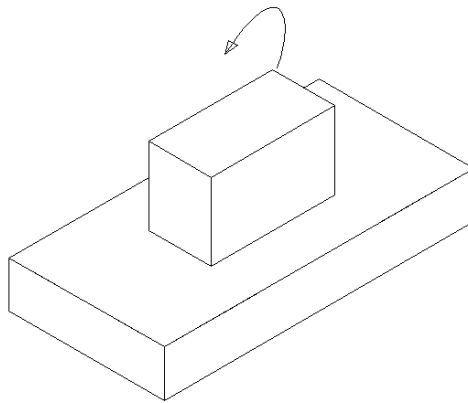
#### ***1.6.2 Asentamientos diferenciales.***

Los asentamientos diferenciales excesivos pueden producir graves problemas en la maquina) coincida con el centro de inercias para que no se produzcan momentos torsionales causantes de asentamientos diferenciales.

La cimentación deber ser lo suficientemente rígida y fuerte, así como poseer la inercia suficiente, para soportar esfuerzos producidos tanto en su construcción como cuando la maquinaria entre en operación.

#### ***1.6.3 Vuelco.***

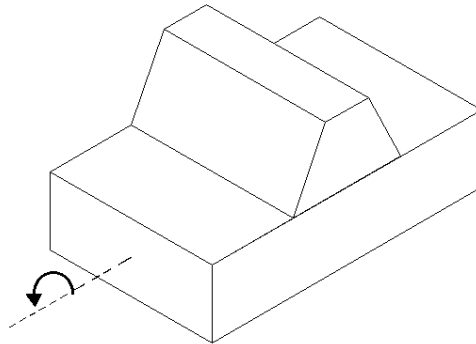
Considerando que las cimentaciones funcionan también como pedestales de la maquinaria y tomando en cuenta que el torque inicial de muchas maquinas es bastante alto, es importante suponer que las cimentaciones estarán afectadas por un momento de vuelco que se desarrolla en la base de la estructura, por lo tanto es obvio que será muy beneficioso el ampliar la cimentación en el plano para tener un gran brazo de palanca que contrarreste el par de vuelco.



**IMAGEN 0.14 - Momento de Vuelco (Luca Limaico)**

#### **1.6.4 Torsión.**

Los elementos de concreto reforzado están sometidos comúnmente a momentos flectores, y además existe equipo que puede originar grandes pares de torsión en un plano horizontal que tienden a retroceder el elemento con respecto a su eje longitudinal. Por ello se requiere de elementos especiales y configuraciones estructurales específicas que puedan resistir tal acción, como la colocación de refuerzo con estribos poco espaciados y barras longitudinales.



**IMAGEN 0.15 - Par de Torsión(Luca Limaico)**

#### ***1.6.5 Provisiones para accesorios.***

Normalmente al proyectarse la cimentación de maquinaria se debe contemplar los accesorios que ésta necesita para su correcto funcionamiento; ventilación de motores, conductos, cables, etc.

Conviene tener indicadores en el suelo de la cimentación para localizar los conductos embebidos en el hormigón para reparaciones futuras.

#### ***1.6.6 Dilatación.***

Las fuentes de calor pueden ocasionar excesivas dilataciones en la cimentación que conduzcan al fallo de la misma, el normal funcionamiento de la maquinaria generará calor en sus elementos, si el bastidor de la misma llega a poseer una temperatura mucho mayor que la de su cimentación, uno de los dos elementos se romperá, por ello se debe considerar mecanismos de enfriamiento como ventilación mecánica o una ventilación ambiental correcta.

### ***1.6.7 Protección.***

Los elementos de acero en el hormigón armado de la cimentación de maquinaria, están diseñados mediante técnicas de la ingeniería civil por lo que su protección ante la corrosión está contemplada con antelación, pero los elementos de acero externos deberán ser protegidos. Pernos de anclaje así como los bastidores de las máquinas, deben estar protegidos de la corrosión, por lo que es recomendable elevar el hormigón por encima del piso de tal manera que proteja a estos elementos del agua.

### ***1.6.8 Vibración.***

Como ya se ha mencionado en la sección CRITERIOS DE DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA MAQUINARIAS, la vibración es uno de los puntos más importantes a considerar al momento de proyectar una cimentación sujeta a este tipo de esfuerzos; la vibración del sistema (Maquinaria-cimentación) puede generar problemas muy graves si esta no es considerada y resuelta de manera adecuada. Se producen altas vibraciones principalmente en maquinaria que posea partes rotatorias que funcionan a elevadas velocidades; producto de su normal funcionamiento, este movimiento cíclico generado posee una frecuencia que se expresa en función de la velocidad angular de la misma, por lo tanto, es imperante que se diseñe una cimentación que tenga una frecuencia lejana a la frecuencia de la maquinaria para evitar fenómenos de resonancia que generen un daño mayor como se ha descrito anteriormente en el presente trabajo.

En cuanto a la frecuencia de la maquinaria es necesario recurrir al fabricante de la máquina para obtener dichos datos. La determinación de la frecuencia natural de vibración de un cimiento está dada por procesos empíricos inexactos, que si bien es cierto, brindan datos importantes de referencia, no se puede confiar por completo en dichos valores. Lo deseable es conseguir que la frecuencia máxima de la sustentación no alcance más allá del 25 al 50 por ciento de la frecuencia de la maquinaria o por el contrario que ésta supere en más del 200 al 300 por ciento de la misma, evitando así el fenómeno de resonancia.

Por lo dicho es recomendable limitar la relación de frecuencias, para lo cual es aplicable la siguiente relación para el diseño de cimentaciones sometidas a esfuerzos dinámicos:

$$0.8 \geq \frac{f_o}{f_c} \geq 1.2$$

Donde:

$f_o$  = Frecuencia de la maquinaria

$f_c$  = Frecuencia del sistema Máquina – Cimentación – Suelo

Si se cumple dicha desigualdad se está asegurando que no existe fenómeno de resonancia. Indudablemente cuando el motor del equipo apoyado en el cimiento arranca desde el reposo hasta alcanzar su velocidad de operación, puede igualar la frecuencia de la cimentación, pero este fenómeno ocurre por un lapso de tiempo bastante corto por lo que su efecto puede considerarse despreciable, sin embargo, se

debe plantear la cimentación considerando el caso de frecuencia más crítico del equipo (la más lenta).

Al considerar ciertos principios básicos de la física referente al presente estudio se encuentra que, *“aumentando el peso de la cimentación disminuye el grado de variación del movimiento originado por un impulso dado.”* (Dunham, 1968)

Conclusión que resulta obvia al analizar la fórmula:

$$F = m * a$$

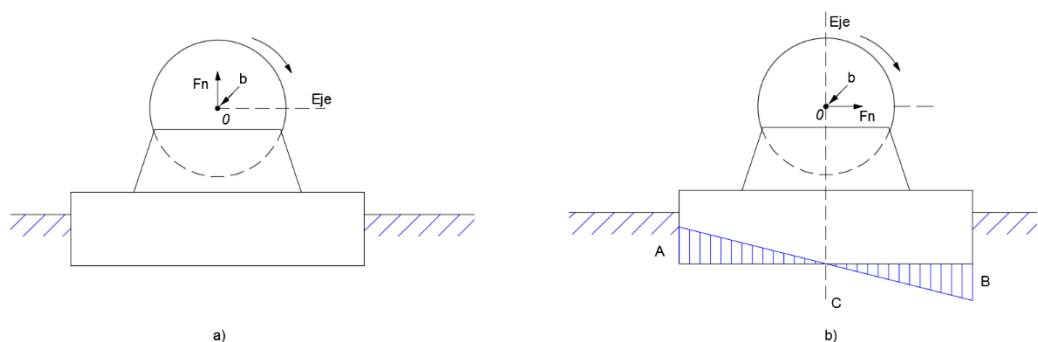
F = Fuerza Aplicada

M = Masa

A = Aceleración

Al sustentar maquinaria con mecanismos oscilatorios, tratamos con fuerzas centrífugas que afectan a todo el sistema, producidas por la naturaleza de su funcionamiento

IMAGEN 1.8 (a).



**IMAGEN 0.16 - Ejemplo de algunos principios de vibraciones. (Dunham, 1968)**

Analizando un movimiento giratorio con un sentido horario de la IMAGEN 1.10. (b)

se encuentra que en un instante del movimiento, se produce una presión en el suelo en el punto B, y posteriormente un empuje en el punto A; si se considera un carácter

cíclico de este movimiento, se logra determinar que existirá una oscilación en C y se producirá una vibración en el punto O, mientras dure el movimiento circular. Por lo tanto el módulo de Young (E) del suelo y la rigidez del mismo pasan a un plano de importancia mayor, puesto que este será el único capaz de soportar dichos esfuerzos del sistema.

Si el suelo bajo la cimentación permite una deformación constante en los puntos A y B de la IMAGEN 1.10. (b) la oscilación producida en el punto C puede llegar a ser excesiva y generar graves problemas en el sistema (maquinaria-cimentación), por lo que es esencial apoyar este último en suelos con excelente rigidez.

Como se ha mencionado anteriormente, la maquinaria sustentada debe poseer pernos de anclaje que la sujeten a la cimentación, esta consideración toma validez al estudiar el punto A de la IMAGEN 1.10. (b), puesto que en este lugar se concentran fuerzas de empuje y el momento de vuelco propio de la maquinaria que tratan de levantar todo el sistema.

La masa total de todo el sistema además de las fuerzas de fricción presentes entre los puntos A y B evitan los desplazamientos laterales que pueden producirse.

## **CAPITULO II TIPOS DE CIMENTACIONES**



La cimentación de cualquier estructura es, por decirlo menos, la parte fundamental de la misma. Es un conjunto de elementos estructurales encargados de transmitir todos los esfuerzos generados por la estructura al suelo, de forma que estos no superen su esfuerzo admisible, ni generen deformaciones excesivas en el mismo. La cimentación es tal vez el único elemento dentro de una estructura que no admite fallas en cuanto a su cálculo o construcción. Si una viga o una columna resultan con resistencias inferiores a las deseadas, estas podrían ser solucionadas con un reforzamiento o reparación mediante métodos aplicables con facilidad, pero al contrario si una cimentación presenta problemas al momento de su funcionamiento, una reparación de la misma no podría ser posible por su función y ubicación dentro de la estructura y de igual manera su restauración generaría costos excesivos.

Al proyectar la cimentación de maquinaria se debe en primer lugar, determinar el tipo de sustentación que se va a utilizar, en función de los esfuerzos y características propias de cada equipo, descritos en el capítulo 1 del presente trabajo.

En cuanto a la constitución de la sustentación es importante tomar en consideración, que esta deberá estar conformada en un nivel de cota adecuado que no genere problemas en cuanto al tipo de suelo ubicado alrededor de la misma, así como controlar niveles freáticos que puedan ocasionar variaciones de volumen en el suelo que se traduzcan en problemas serios sobre la cimentación; se debe evitar suelos que posean características expansivas y evaluar correctamente el tipo de cimentación que se requiera para cada caso, considerando los parámetros anteriormente descritos y el estrato de suelo que sea capaz de soportar los esfuerzos de la superestructura.

Es importante, al momento de implantar la cimentación de una estructura, considerar todos los posibles efectos que la sustentación de estructuras colindantes puedan generar en ella, así como evitar todos los elementos que de alguna manera puedan generar conflictos a futuro como la presencia de ríos cercanos, pozos acuíferos, conducciones de agua, arboles, etc.

Por lo dicho anteriormente, es evidente que la proyección de una cimentación está en función de las capacidades mecánicas del suelo, por lo que es necesario un conocimiento previo total de las características del suelo en el que se va a construir la estructura.

Al considerar que la capacidad portante del suelo suele ser inferior a las cargas entregadas por la estructura se determina que evidentemente, el volumen de la cimentación en general, es bastante mayor al volumen de la estructura, para producir así, un área de contacto entre la estructura y el suelo que permita una mejor distribución de esfuerzos.

## **2.1 Clasificación de las cimentaciones.**

Las cimentaciones se pueden definir en dos grandes grupos en función de la posición del estrato de suelo resistente que son: cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas.

Si las cargas que ejerce la estructura se transmiten directamente al suelo inmediatamente bajo esta, significa que estamos tratando con cimentaciones del tipo superficiales. Arbitrariamente se puede determinar una cimentación superficial como aquella en la que su desplante es menor que su anchura total.

De la misma manera si la capa de terreno resistente se encuentra en una cota de nivel muy por debajo de la base de la estructura los esfuerzos producidos por esta deben transmitirse mediante elementos especiales como pilas, pilotes, etc.

En general la decisión sobre qué tipo de cimentación utilizar para determinado proyecto depende ciertamente de las características mecánicas del suelo pero además hay ciertos factores que inciden en esta decisión, como: la localización de los puntos de apoyo de la superestructura, la magnitud y dirección de los esfuerzos producidos, el conocimiento de los tipos de cimentación que se puede utilizar y un factor determinante como lo es la economía general del proyecto.

A continuación se describirá los tipos de cimentación utilizados para la sustentación de maquinaria como:

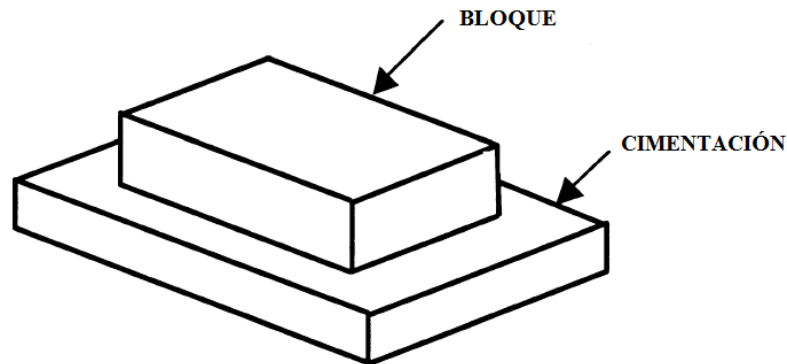
- ✓ Cimentaciones en bloque.
- ✓ Profundas.
- ✓ Pórticos
- ✓ Cimentaciones combinadas.

### *2.1.1 Cimentaciones en bloque.*

Este tipo de cimentaciones son elaboradas contemplando un suelo con características mecánicas óptimas, puesto que presentan una rigidez elevada y son susceptibles a agrietamientos excesivos ante asentamientos diferenciales por lo que de ninguna manera deben ser concebidas con juntas de construcción.

Son proyectadas para reducir o evitar los efectos producidos por momentos de volcamiento, al disminuir la diferencia de altura entre el centro de gravedad de la maquinaria y el centro de gravedad de la sustentación.

Una consideración importante que se debe tomar en cuenta en este tipo de cimentaciones es conseguir que el eje geométrico de la máquina y el eje de la cimentación se encuentren en la misma alineación.



*IMAGEN 0.1 - Esquema de cimentación en bloque*  
Fuente:. (ACI Committee, 2004)

### *2.1.2 Cimentaciones profundas.*

Existen ciertos tipos de suelos de características mecánicas muy pobres (inestables, con asentamientos elevados, suelos expansivos, etc.) que no son lo suficientemente aptos para soportar los esfuerzos generados por una estructura, por lo que se requiere utilizar cimentaciones que distribuyan eficientemente los esfuerzos generados por la superestructura, en estratos de suelo resistentes que se encuentran en niveles de terreno inferiores.

Se recomienda además, la utilización de este tipo de cimentaciones cuando se quiere soportar estructuras que estarán sometidas a fuertes esfuerzos de tracción producto de cargas de viento o cuando estas posean anclajes directamente al suelo.

Existen diferentes tipos de cimentaciones profundas que han sido utilizadas a lo largo del tiempo, pero evidentemente la sustentación mediante pilotes es la que mejores resultados en cuanto a comportamiento ha ofrecido.

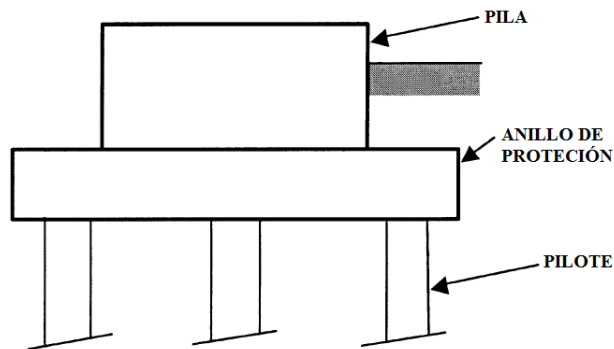
### *2.1.2.1 Cimentaciones por Pilotes.*

Este tipo de cimentaciones básicamente está constituido por uno o un conjunto de pilotes dispuestos adecuadamente que se hincan en el suelo mediante diferentes procesos; son los más utilizados al hablar de cimentaciones profundas. Sometidos preferentemente a esfuerzos axiales que pueden ser de compresión o de tracción. Pueden transferir esfuerzos al estrato de suelo resistente, mediante la punta, la fricción en el fuste del pilote o una combinación de ambos.

Se recomienda que de llegar a existir esfuerzos horizontales en la estructura, se disponga de pilotes ubicados de manera inclinada capaces de soportar los esfuerzos mencionados.

Los pilotes generalmente utilizados en la actualidad son aquellos fabricados completamente de acero, de hormigón tanto pre-fabricado como fabricado in-situ así como una combinación de ambos materiales.

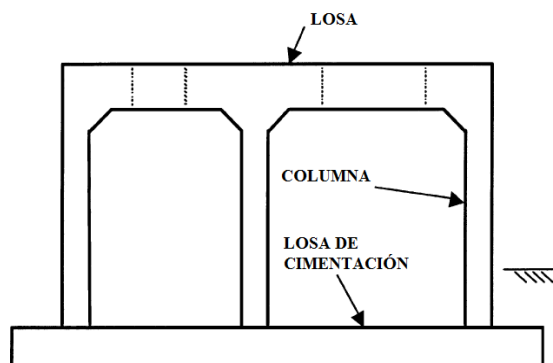
Existen registros de proyectos exitosos de la antigüedad en los que se ha empleado troncos de madera. Evidentemente este tipo de pilotes no será considerado en el presente estudio.



**IMAGEN 0.2 - Esquema de cimentación por pilotes**  
**Fuente: (ACI Committee, 2004)**

### **2.1.3 Cimentaciones por pórticos.**

Son sustentaciones elevadas que soportan la carga mediante un sistema estructural compuesto por vigas, columnas, losa y losa de cimentación. Se utilizan para maquinaria que requiera de diferentes tipos de accesorios como ductos, tuberías inferiores o elementos auxiliares para su correcto funcionamiento. La losa sobre la que descansará directamente la maquinaria debe ser proyectada como una losa flexible capaz de soportar los movimientos complicados que generará el funcionamiento de la máquina y distribuirlos a los elementos estructurales.

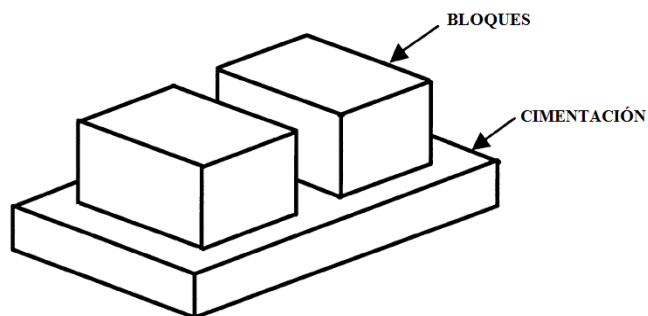


**IMAGEN 0.3 - Esquema de cimentación en pórtico.**  
**Fuente (ACI Committee, 2004)**

#### **2.1.4** *Cimentaciones combinadas en bloque.*

Es posible diseñar cimentaciones en bloque combinadas capaces de soportar varias máquinas a la vez; considerando que estas cimentaciones estarán sujetas a vibraciones con una frecuencia específica que podrían llegar a ser similares y que se debe buscar un centro de masas lo más cercano a la rasante posible.

Son cimentaciones que presentan serias complicaciones al momento de ser diseñadas, puesto que deben ser capaces de soportar varios tipos de esfuerzos a la vez y poseer la rigidez necesaria.



**IMAGEN 0.4 - Esquema de cimentación combinada en bloque.**  
Fuente (ACI Committee, 2004)



## **CAPITULO III ACCIONES DINÁMICAS SOBRE CIMENTACIONES**

A lo largo de toda la vida útil de una cimentación esta deberá ser capaz de soportar todos los esfuerzos a los que estará sometida, de manera segura y eficiente. Cuando hablamos de estructuras que sustentarán maquinaria hay que considerar, a más de los esfuerzos estáticos que ésta genera, los movimientos propios del funcionamiento de la maquinaria que se encuentran en función de su velocidad de operación y del tipo de equipo; asumiendo que los esfuerzos pueden variar dependiendo el tipo de maquinaria.

En el presente capítulo se especifica de manera general las diferentes acciones a las que estará sometida la cimentación a lo largo de su vida útil.

### **3.1 Acciones permanentes.**

Identificamos como acciones permanentes a todos los efectos generados sobre la cimentación que se encuentran persistentemente a lo largo de su vida útil con una magnitud constante, entre los que se puede mencionar: el peso propio de la cimentación, el peso de la máquina, peso de equipo auxiliar, peso de plataformas, peso de estructuras o equipo de seguridad, etc. En la literatura antigua existente sobre la proyección de cimentaciones, se menciona que los esfuerzos dinámicos son sustentados planteando estructuras que tripliquen o quintupliquen el peso total de la máquina. Dicho concepto resulta obsoleto en la actualidad, considerando que fue

planteado sin la ayuda de los avances tecnológicos en cuanto a análisis estructural computacional que poseemos en la actualidad, que nos permiten desarrollar cimentaciones con características específicas para cada caso de estudio.

### 3.2 Acciones variables.

Al referirnos a acciones variables sobre la cimentación nos referimos específicamente a todas las cargas vivas presentes, que pueden determinarse a partir de los códigos o normativa vigente en el país.

Ocupación o Uso	Carga Uniforme (KN/m <sup>2</sup> )	Carga Concentrada (KN)
Fábricas/Industria/Manufactura		
Livianas	6.00	9.00
Pesadas	12.00	13.40

***TABLA 0.1 - Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas***  
Fuente:.. (NEC, 2013)

### 3.3 Acciones Térmicas

Las acciones térmicas se identifican como la expansión o contracción de un elemento producto de la variación de los campos de temperatura dentro de un intervalo de tiempo específico.

Para el actual caso de estudio, las acciones térmicas son producto de las variaciones de temperatura generadas por el funcionamiento normal de la maquinaria, las

condiciones climáticas, radiación solar, etc. Este tipo de acciones deben ser consideradas tanto como permanentes y variables.

Las acciones térmicas deben ser soportadas por los apoyos propios de la maquinaria pero si estos se encuentran con un porcentaje de desgaste o bajos niveles de lubricación, se debe considerar su efecto en la cimentación. El fabricante de la maquinaria es quien debería entregar la información de las acciones sobre la sustentación en el caso de que deban ser consideradas en el diseño por su magnitud.

### **3.4 Carga de par torque normal.**

El movimiento que se produce en mecanismos de émbolo, como los turbogeneradores, por su normal funcionamiento, genera un par de fuerzas que actúa sobre los soportes del equipo, que posee un sentido contrario al del movimiento del motor, cuya magnitud depende de la masa, la velocidad y la potencia de la máquina.

### **3.5 Cargas dinámicas.**

Las cargas dinámicas generadas por maquinaria se producen principalmente cuando esta sufre desbalanceo en su mecanismo, por lo que deben ser determinadas de la manera más exacta posible. Se necesita acumular la mayor cantidad de información disponible para este efecto y determinar dichas fuerzas. El fabricante del equipo a sustentar es quien debe proporcionar la información completa de las cargas dinámicas que su máquina genera en su funcionamiento.

Se pueden generar varios tipos de fuerzas dinámicas, además de las estáticas, en el funcionamiento de la maquinaria como consecuencia del tipo de máquina, el modelo, la instalación, su velocidad de operación, etc.

Algunas causas de vibraciones en el sistema cimentación-maquinaria son:

- Rotación de elementos que producen diferentes fuerzas internas de carácter oscilatorio que actúan sobre los apoyos de la máquina.
- Desbalance en el quipo por la no coincidencia entre el eje geométrico del equipo y el eje de rotación de su motor.
- El desgaste natural en ciertos elementos de la maquina producen efectos de desbalanceo que generan esfuerzos importantes.
- Es posible que se puedan producir vibraciones por diferentes causas como: las reacciones de los apoyos, la combinación de esfuerzos de la masa y rigidez de la sustentación, deformaciones y asentamientos de la cimentación, etc.

La determinación exacta de todas las características de los esfuerzos dinámicos a los que estará sujeta la cimentación como son su magnitud, dirección, sentido, etc. constituye un paso esencial para el correcto análisis de dicha sustentación. Es evidente que las cargas dinámicas estarán definidas en función del tipo de maquinaria que se debe soportar, a continuación se presenta una descripción de las características de dichas cargas para maquinas reciprocantes y centrifugas.

### 3.5.1 Fuerza dinámica en máquinas centrífugas.

Como se ha descrito ya en el apartado 1.1.1 del presente documento, las máquinas centrífugas son todas aquellas que describen movimientos circulares en su funcionamiento (Bombas, compresores, turbogeneradores, etc.), y están diseñadas para operar a una velocidad constante.

Por su naturaleza este tipo de máquinas generan una fuerza que puede expresarse como:

$$F = F_o \sin wt \quad \text{Ec 0.1}$$

Donde la fuerza  $F_o$  está dada por:

$$F_o = m_e e w^2 \quad \text{Ec 0.2}$$

En estas ecuaciones se puede mencionar:

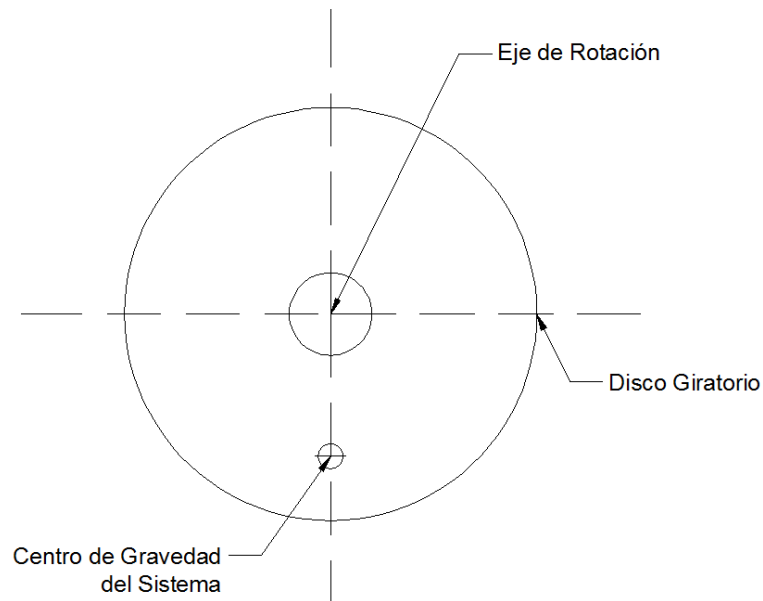
$F_o = \text{Fuerza Desbalanceada.}$

$m_e = \text{Masa total desbalanceada.}$

$e = \text{Excentricidad.}$

$w = \text{Frecuencia.}$

En la IMAGEN 3.1 podemos identificar un esquema de un equipo de este tipo.



***IMAGEN 0.1 - Esquema de maquina centrífuga (Luca Limaico)***

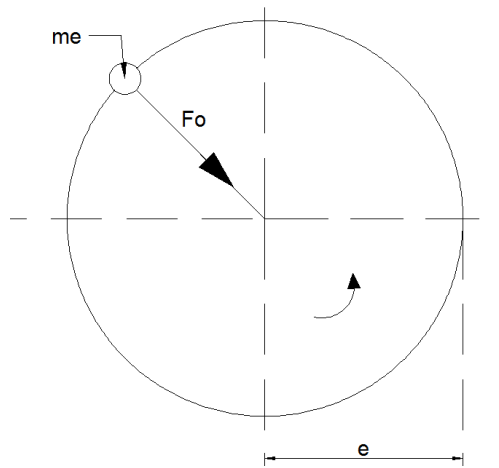
Por lo expuesto anteriormente, es deseable evitar toda fuerza producto de un desbalanceo, y si bien es cierto es teóricamente posible lograrlo al compensar el desbalanceo con la colocación de una masa equivalente en el extremo contrario del eje de rotación, en la práctica existen mecanismos que no pueden ser modificados o balanceados por su configuración, su montaje o su diseño.

De la ecuación (3.2) los parámetros de masa total y frecuencia son obtenidos de las especificaciones del fabricante por lo que se debe determinar la excentricidad del movimiento. Existen casos en los que resulta muy complicado determinar la fuerza de desbalanceo por lo que es necesario que el fabricante la determine mediante instrumentación especializada y proporcione dicha información al diseñador.

Casos de desbalanceo:

### 3.5.1.1 Una sola masa rotatoria.

Cuando se tiene una sola masa en un sistema rotatorio, se genera una fuerza centrípeta que se expresa como un vector con dirección al centro de rotación del sistema (IMAGEN 3.2), la ecuación (3.2) expresa la magnitud de dicha fuerza.

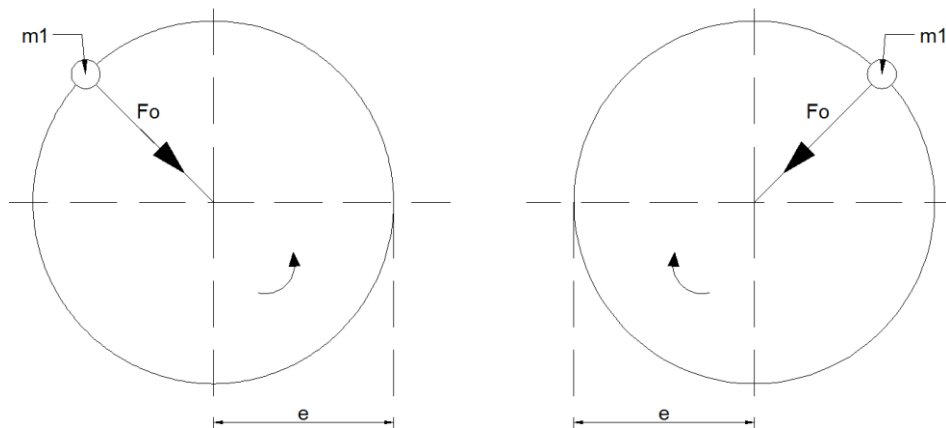


**IMAGEN 0.2 - Sistema giratorio con una sola masa. (Luca Limaico)**

### 3.5.1.2 Dos masas rotatorias.

Se puede tener el caso de dos sistemas oscilatorios dentro del mismo eje de rotación o a su vez dos sistemas con ejes específicos pero paralelos (IMAGEN 3.3), en cualquiera de los casos, las componentes verticales del vector fuerza se sumarán. Para determinar la fuerza total sobre la cimentación, la expresión que caracteriza dicha fuerza es:

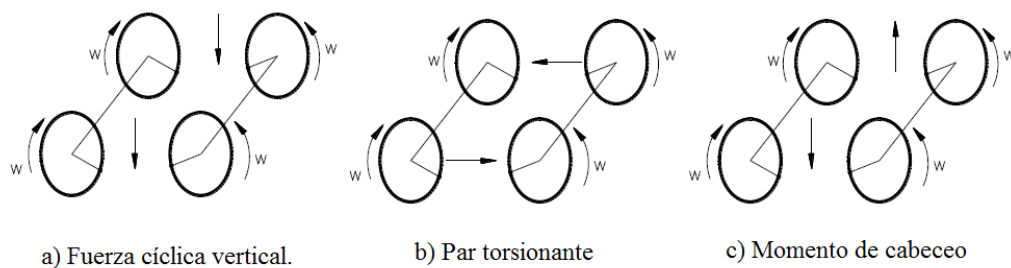
$$F = 2m_1ew^2 \sin wt \quad \text{Ec 0.3}$$



**IMAGEN 0.3 - Sistema giratorio con dos masas (Luca Limaico)**

### 3.5.1.3 Cuatro masas giratorias.

Existen mecanismos que requieren del efecto de oscilación que producen cuatro masas; en el caso de varios vibradores, es común por parte de los fabricantes utilizar cuatro masas iguales con excentricidades similares distribuidas en los extremos de dos ejes paralelos, configurando diferentes tipos de arreglos en cuanto al funcionamiento del equipo. (IMAGEN 3.4)



**IMAGEN 0.4 - Fuerzas excitadoras con masas rotatorias. (Dunham, 1968)**



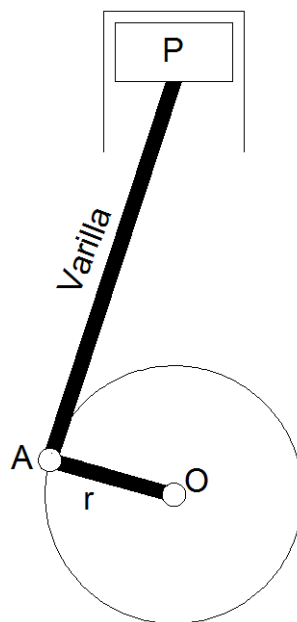
Existe una ecuación que representa a los casos de par torsionante y momento de cabeceo:

$$M = 4m_1 e \frac{d}{2} w^2 \sin wt \quad \text{Ec 0.4}$$

*d*: La distancia existente entre los ejes.

### 3.5.2 Fuerza dinámica en máquinas reciprocantes.

Considerando lo expresado en la sección 1.1.2 de este documento sobre el funcionamiento de este tipo de equipos, es evidente que se requiere definir las fuerzas que este ejerce sobre la cimentación. El fabricante del equipo es quien debe proporcionar la información sobre las fuerzas dinámicas resultantes actuantes en el sistema maquinaria-cimentación.



**IMAGEN 0.5 - Esquema de un pistón. (Luca Limaico)**

En la IMAGEN 3.5 se esquematiza el funcionamiento de un mecanismo a partir de un pistón y manivela. Se puede distinguir un pistón "P" que se mueve de manera vertical dentro de un cilindro que hace de guía unido mediante una varilla a una manivela de longitud "r" que describe un movimiento circular al hacer eje de giro en el punto O.

Si se conoce la velocidad angular de la manivela, se puede determinar el desplazamiento del pistón dentro del cilindro en cualquier instante de tiempo (Ecuación 3.5). A partir de esta expresión se puede derivar la velocidad (3.6) y a su vez su aceleración (3.7).

$$y_p = \left( r + \frac{r^2}{4L} \right) - r \left( \cos wt + \frac{r}{4L} \cos 2wt \right) \quad \text{Ec 0.5}$$

$$\dot{y}_p = rw \left( \sin wt + \frac{r}{2L} \sin 2wt \right) \quad \text{Ec 0.6}$$

$$\ddot{y}_p = rw^2 \left( \cos wt + \frac{r}{L} \cos 2wt \right) \quad \text{Ec 0.7}$$

$y_p$  = Desplazamiento del piston [mm]

$r$  = Longitud de la manivela [mm]

$L$  = Longitud de la varilla [mm]

$w$  = Frecuencia de operacion del equipo.

$t$  = Tiempo.

Para tratar de mitigar los efectos de desbalanceo de este tipo de maquinarias, se coloca una masa concentrada en el punto A, que trata de generar una inercia similar a la del sistema original, el desplazamiento vertical del punto A se expresa por la ecuación:

$$y_A = r(1 - \cos wt) \quad \text{Ec 0.8}$$

Al derivar la ecuación (3.8) en función del tiempo se obtiene la siguiente expresión de la velocidad:

$$\dot{y}_A = rw \sin wt \quad \text{Ec0.9}$$

Si se realiza la segunda derivada de la expresión del desplazamiento, se obtiene la aceleración del punto A.

$$\ddot{y}_A = rw^2 \cos wt \quad \text{Ec 0.10}$$

Al proyectar el punto A sobre el eje x, se obtiene:

$$x_A = -r \sin wt \quad \text{Ec 0.11}$$

$$\dot{x}_A = -r \cos wt \quad \text{Ec 0.12}$$

$$\ddot{x}_A = rw^2 \sin wt \quad \text{Ec 0.13}$$

Es importante, para el diseño de la sustentación de estos equipos, conocer las fuerzas de impacto y de inercia que estos generan. Si se multiplica la velocidad por la masa del elemento en movimiento se obtiene la fuerza de impacto. La fuerza de inercia es el resultado del producto de la masa en movimiento por su aceleración.

Para obtener la fuerza inercial de todo el sistema, se asume que una parte de la masa de la varilla que une al pistón con la manivela pertenece al movimiento reciprocante

$m_{rec}$ , la otra parte de la varilla pertenece al conjunto que rota  $m_{rot}$  y al considerar las ecuaciones (3.7), (3.10) y (3.13) se obtiene que:

$$F_y = m_T r w^2 \cos wt + m_{rec} \frac{r^2}{L} w^2 \cos wt \quad \text{Ec 0.14}$$

La fuerza horizontal se identifica como:

$$F_x = m_{rot} r^2 w^2 \sin wt \quad \text{Ec 0.15}$$

En las cuales se conoce que:

$$m_T = m_{rec} + m_{rot}$$

Finalmente se sabe que el momento actuante alrededor del eje O es:

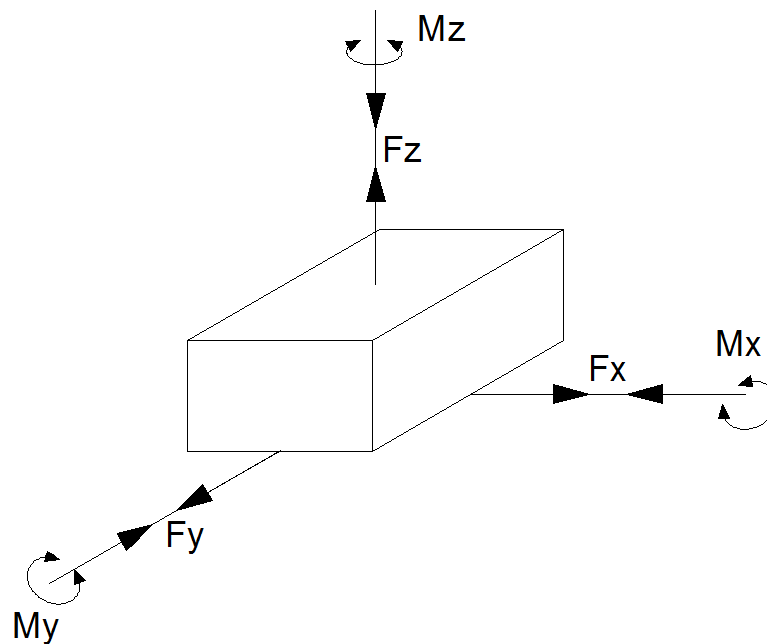
$$M = -m_{rec} w^2 r^2 \sin wt \left( \frac{r}{2L} + \cos wt + \frac{3r}{2L} \cos 2wt \right) \quad \text{Ec 0.16}$$

## CAPITULO IV ANÁLISIS DINÁMICO Y MODELACIÓN DE CIMENTACIONES.

El análisis de una cimentación sometida a esfuerzos dinámicos puede llegar a ser una tarea compleja al considerar todos los esfuerzos actuantes, por ello es necesario recurrir a métodos de análisis probados anteriormente que han generado buenos resultados.

#### 4.1 Modos de Vibración.

Una cimentación en general posee 6 grados de libertad y por lo tanto, 6 frecuencias naturales específicas de cada uno de esos posibles movimientos; estos movimientos corresponden a tres del tipo rotacionales y tres del tipo traslacionales.



*IMAGEN 0.1 - Modos de Vibración. (ACI Committee, 2004)*

#### 4.2 Métodos para el análisis dinámico.

#### **4.2.1 Método Empírico**

Se basa en datos obtenidos de manera práctica, con sus posibles errores en levantamiento de datos.

##### **4.2.1.1 Solución de Tschebotarioff:**

Tschebotarioff determinó un parámetro de reducción de la frecuencia natural  $f_{nr}$  en función del área de contacto. Posteriormente se definió este parámetro ( $f_{nr}$ ) como el producto entre la frecuencia natural la raíz cuadrada de la presión de contacto.

$$f_{nr} = f_n \sqrt{\sigma} \quad \text{Ec. 0.1}$$

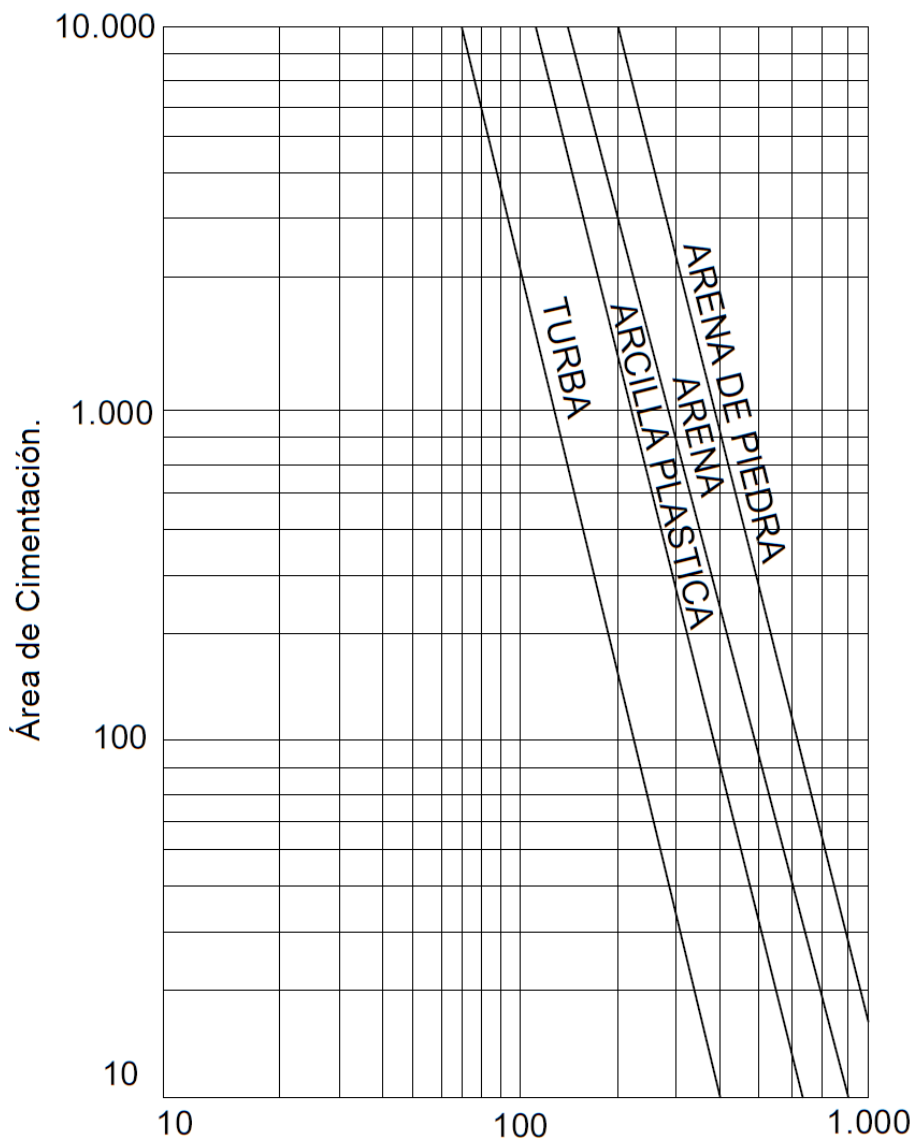
Siendo,

$$\sigma = \frac{W}{A_t} \quad \text{Ec. 0.2}$$

$W =$  *Peso de la cimentación.*

$A_t =$  *Área de la cimentación proyectada al suelo.*

Gracias a esta correlación (4.1) mostrada a manera de ábaco en la imagen 4.2, se puede determinar la frecuencia natural del sistema máquina-cimentación conociendo el área de contacto. Un limitante importante de este ábaco que está dado únicamente para 4 tipos de suelos.



**IMAGEN 0.2 - Reducción de la frecuencia natural. (Dobry & Gazetas, 1986)**

#### 4.2.1.2 Solución de Alpan:

Alpan dedujo una expresión para la frecuencia natural a partir de la teoría de Tschebotarioff.

$$f_n = \frac{\alpha}{\sqrt{W}} * (Af)^{1/4} \quad \text{Ec. 0.3}$$

$W$  = Peso del equipo y la cimentación (Kg)

$A_f = \text{Área de cimentación (m}^2\text{)}$

$\alpha = \text{Constante en función del suelo.}$

Tipo de Suelo	$\alpha$
Turba	3900
Arcilla Plástica	69000
Arena	82000
Arena Molida	111000

En el diseño se debe considerar que los métodos descritos tienen una naturaleza empírica por lo que son recomendables únicamente en diseños preliminares.

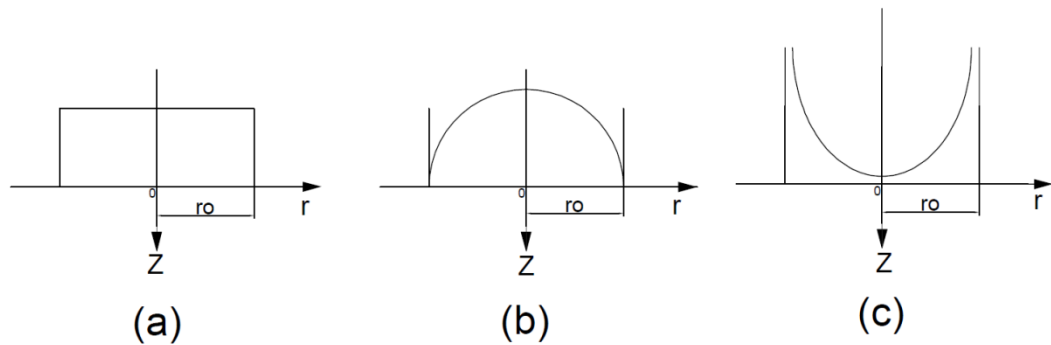
#### **4.2.2** *Método basado en considerar al suelo como un medio Semi-Infinito elástico.*

La hipótesis principal del método, plantea un sistema vibratorio oscilador de base circular que actúa sobre un suelo semi-infinito, isotrópico, linealmente elástico y homogéneo.

La cimentación es considerada como el sistema oscilatorio, según la teoría ésta produce una fuerza periódica, con amplitudes específicas.

Se asumen tres tipos de distribución de presiones, (a) uniforme, (b) parábola y (c) producida por una base rígida.





**IMAGEN 0.3 - Distribución de Presiones. (Dobry & Gazetas, 1986)**

#### 4.2.2.1 Solución de Sung-Richard.

Este método trata de abarcar el problema de las vibraciones verticales, asumiendo una distribución de presiones bajo la cimentación en una base rígida. Considera una fuerza excitadora en la cual su amplitud es constante y otra que es función de su frecuencia de excitación.

Existen ábacos en los cuales se puede determinar la fuerza de excitación y la rotación de la masa de excitación, a partir de los factores:

- ✓ Factor de Frecuencia  $W_o$ :

$$W_o = W_z r_o \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad \text{Ec 0.4}$$

- ✓ Radio de masa:

$$b_z = \frac{m}{\rho r_o^3} \quad \text{Ec 0.5}$$

En las ecuaciones 4.4 y 4.5:

$\rho$  = Peso específico.

$G = \text{Módulo de Corte.}$

$r_o = \text{Radio equivalente circular.}$

$$r_o = \sqrt{\frac{At}{\pi}} \quad \text{Ec 0.6}$$

Donde,

$At = \text{Área de cimentación.}$

✓ Factor de amplificación  $a_1$  y  $a_2$ :

Fuerza de excitación constante

$$a_1 = a_z G \frac{r_o}{\rho_o} \quad \text{Ec 0.7}$$

Fuerza de excitación tipo masa rotatoria.

$$a_2 = a_z \frac{\rho r_o^3}{e m_e} \quad \text{Ec 0.8}$$

En las ecuaciones 4.7 y 4.8:

$a_z = \text{Amplitud de resonancia vertical.}$

Los términos  $e$  y  $m_e$  se encuentran definidos en la sección 1.3.2.2 del presente documento.

Para determinar la fuerza constante de excitación y la rotación de la mesa de excitación se leen los ábacos (4.4 y 4.5) utilizando los valores adimensionales de  $W_o$  o  $a_1$  y  $a_2$  ubicados en las abscisas, y el radio de masa  $b_z$  en las ordenadas.

Se debe considerar el valor del módulo de Poisson ( $\nu$ ) que depende del tipo de suelo en el que se encuentra la cimentación.

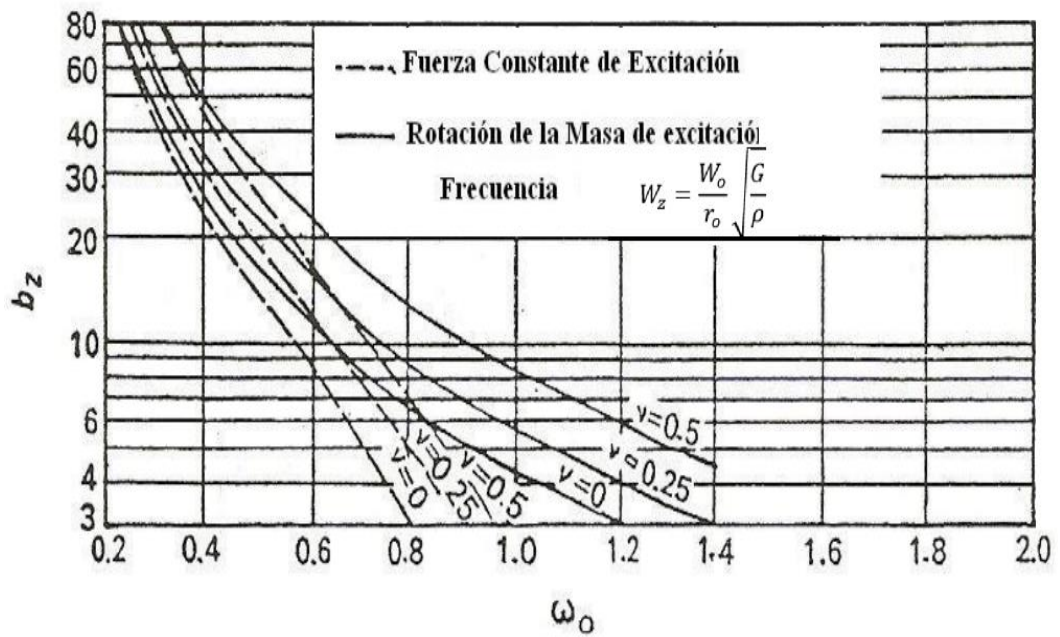


IMAGEN 0.4 - Fuerza constante de excitación y la rotación de la mesa de excitación  
Fuente (Richart F. , 1961)

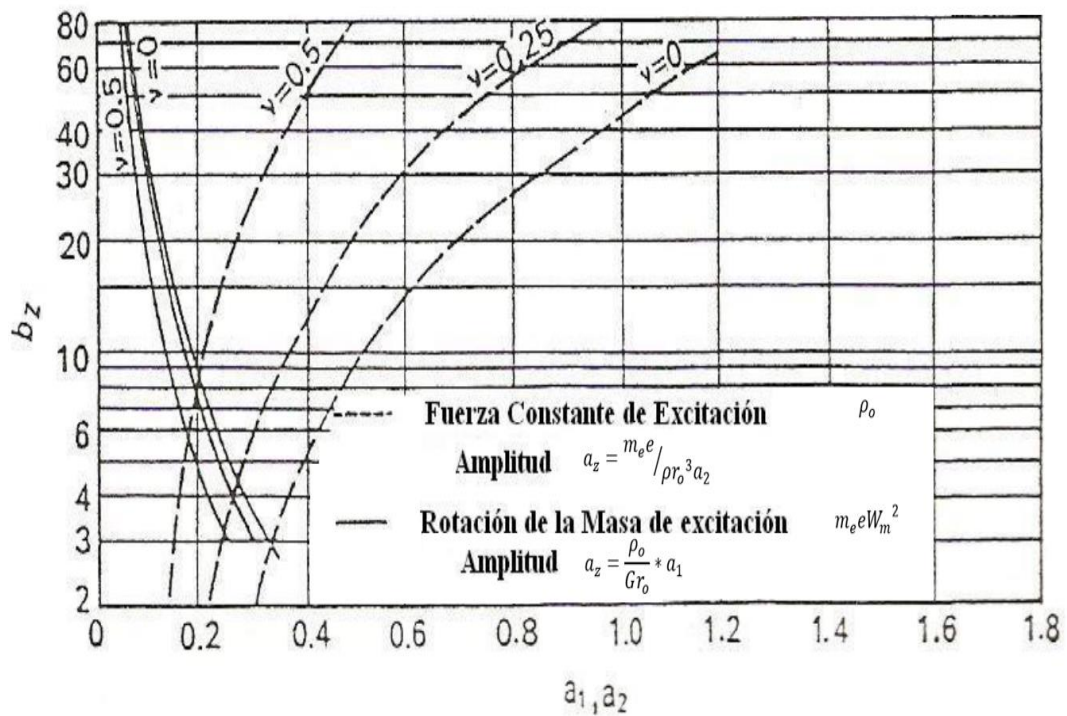


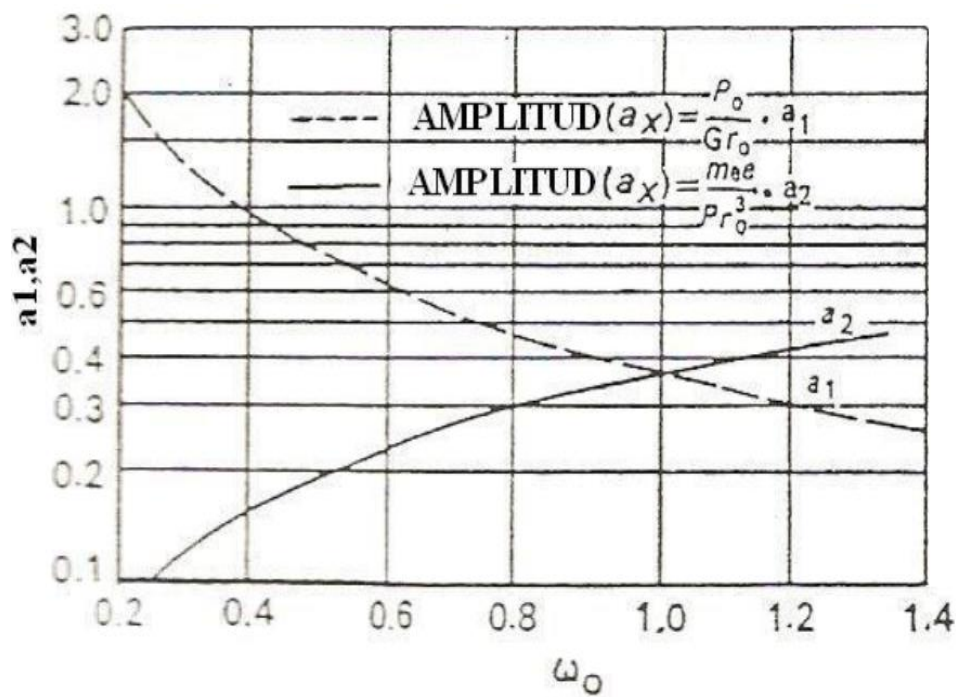
IMAGEN 0.5 - Fuerza constante de excitación y la rotación de la mesa de excitación  
Fuente (Richart F. , 1961)

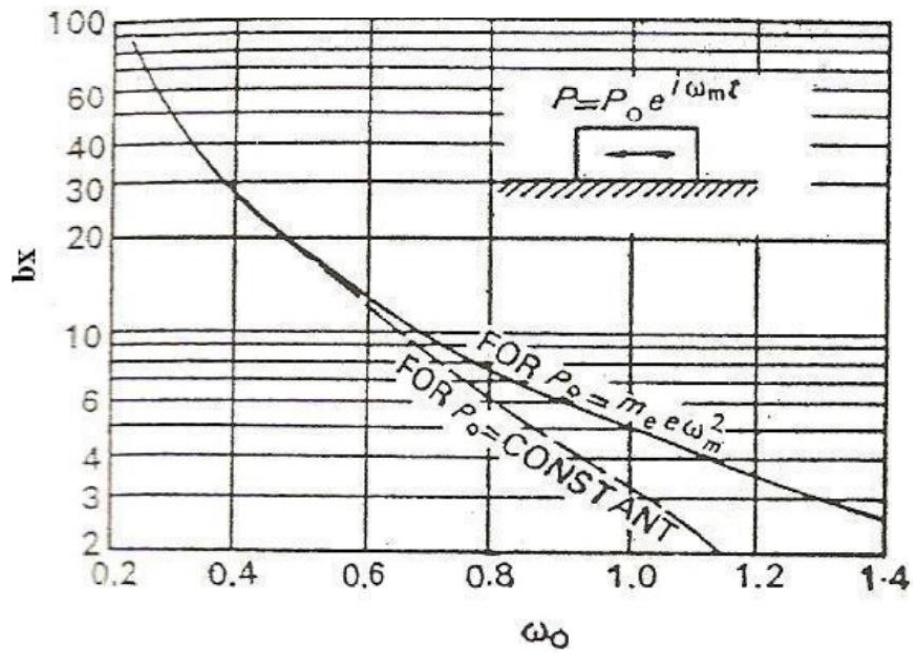
#### 4.2.2.2 Solución propuesta por Arnold, Bycroft y Warburton.

El método fue desarrollado a partir del estadio del deslizamiento y volcamiento de una sustentación cilíndrica ubicada en un suelo considerando semi-infinito elástico.

Al igual que en el método (a) se considera una distribución de presiones como una base rígida, este método considera un valor del módulo de Poisson igual a 0.

La imagen 4.6 muestra el caso del deslizamiento de la cimentación y se encuentra en función de los valores de  $W_0$  en las abscisas y  $b_x$  o  $a_1$  y  $a_2$  en las ordenadas.





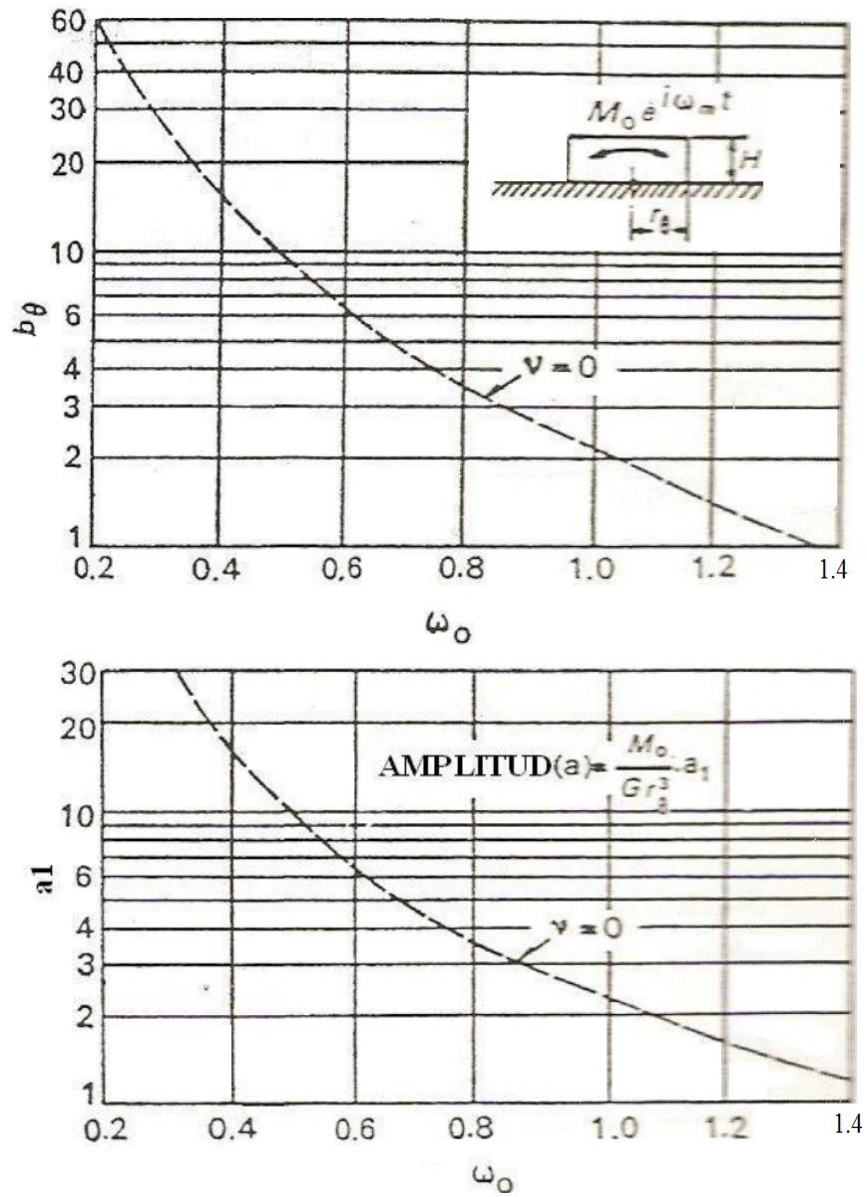
**IMAGEN 0.6 – Caso de deslizamiento de la cimentación**  
**Fuente: (Richart F. , 1961)**

En la imagen que muestra el deslizamiento de la cimentación (4.6) la relación de masas  $b_x$  es igual a:

$$b_x = \frac{m}{\rho r_o^3} \quad \text{Ec 0.9}$$

El radio equivalente de la cimentación  $r_o$  se define en la ecuación 4.6.

La imagen (TANTO) esquematiza el caso del volcamiento de la cimentación considerando los factores  $W_o$ ,  $b_\theta$  y  $a_1$ .



**IMAGEN 0.7 - Caso de volcamiento de la cimentación**

Fuente (Richart F. , 1961)

Donde el término  $W_o$  está determinado por la expresión:

$$W_o = W_\theta r_\theta \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad \text{Ec 0.10}$$

$$r_\theta = \sqrt[4]{\frac{4I_o}{\pi}} \quad \text{Ec 0.11}$$

$I_o$  es el momento de inercia de la base alrededor del eje de rotación.

La relación de inercia  $b_\theta$  se define como:

$$b_{\theta} = \frac{\rho_o}{\rho r_{\theta}^3} \quad \text{Ec 0.12}$$

El momento de excitación  $M_o$  es función de la frecuencia de operación.

#### 4.2.2.3 Solución de Hsieh.

En este método analítico se considera una distribución de presiones tipo base rígida y se plantea las siguientes ecuaciones del movimiento de la cimentación:

Desplazamiento:

$$m\ddot{x} + \sqrt{\rho G} r_o^2 F_2 \dot{x} + F_1 G r_o x = P_o \sin W_m t \quad \text{Ec 0.13}$$

Rotación:

$$\varphi \ddot{\theta} + \sqrt{\rho G} r_o^4 F_2 \dot{\theta} + F_1 G r_o^3 \theta = M_o \sin W_m t \quad \text{Ec 0.14}$$

De las ecuaciones mencionadas; los factores  $F_1$  y  $F_2$  se obtienen de la tabla (4.1) que se encuentra expresada en función del modo de desplazamiento y el módulo de Poisson, considerando que las expresiones mostradas son de la forma:

$$F = \alpha_1 - \alpha_2 W_o^2 \quad \text{Ec 0.15}$$

En la cual  $W_o$  es el factor de la frecuencia y se expresa de la forma:

$$W_o = W_n r_o \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad \text{Ec 0.16}$$

**TABLA 0.1 - Tabla de valores de  $F_1$  y  $F_2$  Método de HSIEH (Richart, Woods, & Hall, *Vibrations of Soil Foundations*, 1970)**

Modo	Módulo de Poisson	$F_1 = \alpha_1 - \alpha_2 W_0^2$		$F_2 = \alpha_1 - \alpha_2 W_0$	
		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Vertical $0 < W_0 < 1.5$	0	4	0.5	3.3	0.4
	0.25	5.3	1	4.4	0.8
	0.5	8	2	6.9	
Horizontal $0 < W_0 < 2.0$	0	4.5	0.2	2.4	0.3
	0.25	4.8	0.2	2.5	0.3
	0.5	5.3	0.1	2.8	0.4
Oscilatorio $0 < W_0 < 1.5$	0	2.5	0.4	0.4 $W_0$	
Torsión $0 < W_0 < 1.5$	Todos	5.1	0.3	0.5 $W_0$	

Si en las ecuaciones de desplazamiento y rotación se sustituye la expresión  $F_1 = \alpha_1 - \alpha_2 W_0^2$  se obtienen las siguientes igualdades.

$$(m + \alpha_2 \rho r_0^3) \ddot{x} + \sqrt{\rho G} r_0^2 F_2 \dot{x} + \alpha_1 G r_0 x = P_o \sin Wt \quad \text{Ec 0.17}$$

$$(\varphi + \alpha_2 \rho r_0^5) \ddot{\theta} + \sqrt{\rho G} r_0^4 F_2 \dot{\theta} + \alpha_1 G r_0^3 \theta = M_o \sin Wt \quad \text{Ec 0.18}$$

La expresión  $P_o \sin Wt$  es similar a la que se expresa en la ecuación fundamental del movimiento para sistemas de 1GDL sujetos a vibración forzada que se encuentra en el apartado 1.3.2 de este documento y al comparar las dos expresiones (4.17) y (4.18) se puede concluir que:



- 1) El término  $\alpha_2 \rho r_o^3$  representa la masa efectiva del suelo considerada en análisis traslacional; la masa del momento de inercia se identifica con el término  $\alpha_2 \rho r_o^5$  para los modos rotacionales.
- 2) El amortiguamiento C puede ser identificado como  $\sqrt{\rho G} r_o^2$  para modos traslacionales o  $\sqrt{\rho G} r_o^4$  en análisis rotacional.
- 3) Los términos  $\alpha_1 G r_o$  y  $\alpha_1 G r_o^3$  son equivalentes a la rigidez del resorte K para los modos de desplazamiento y rotación respectivamente.

#### 4.2.3 Método analítico para determinar la frecuencia natural de una cimentación.

Se determina un método analítico basado en el principio de conservación planteado por Ford y Haddow para determinar la frecuencia natural de la cimentación:

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2G(1+\nu)\beta_o g}{\frac{\rho g}{\beta_o} + \sigma}} \quad \text{Ec 0.19}$$

La expresión 4.19 identifica la frecuencia natural de vibración en sentido vertical.

Para determinar la frecuencia natural de la cimentación en sentido x, y se utiliza la expresión:

$$f_x = f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G\beta_o g}{\frac{\rho g}{\beta_o} + \sigma}} \quad \text{Ec 0.20}$$

Para las expresiones 4.19 y 4.20:

$\beta_o$  = Factor de reducción que expresa la disminucion de la amplitu en funcion de la profundidad de desplante en el suelo.

$\rho =$  *Peso específico.*

$g =$  *Aceleración de la gravedad.*

$\sigma =$  *Presión del suelo.*

EL factor  $\beta_o$  es determinado de la siguiente manera:

$$\beta_o = \frac{C}{\alpha \sqrt{At} (1 - \nu)^2} \quad \text{Ec 0.21}$$

C es una constante que depende del suelo:

**TABLA 0.2 - Valores de C en función del Suelo**

<b>C</b>	<b>Suelo</b>
2	Arenas
1.5	Arcillas

At es el área de cimentación en pies cuadrados ( $ft^2$ ).

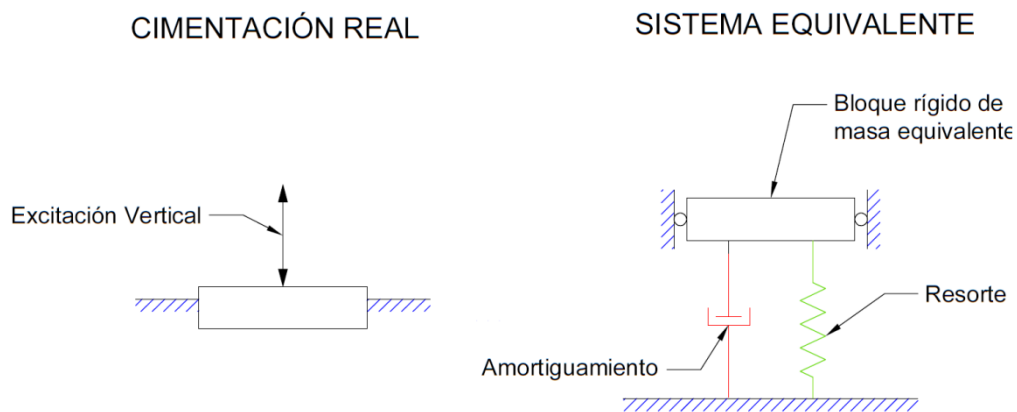
$\alpha$  se expresa como una constante en función de la forma de la cimentación.

**TABLA 0.3 - Valores de  $\alpha$  en función de la forma de la cimentación.**

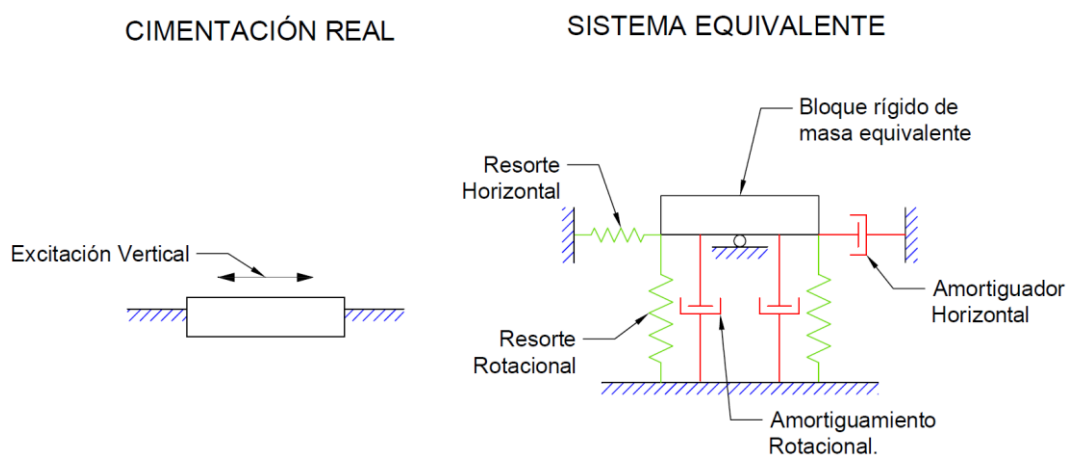
<b>Forma</b>	<b>Relación L/B</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Circular	-	0.96
Cuadrada	1.0	0.95
	1.5	0.94
	2.0	0.92
	3.0	0.88
	5.0	0.82
Rectangular	10	0.71
	100	0.37

#### 4.2.4 Método de Masa-Resorte equivalente.

Existe un método identificado como Masa-Resorte equivalente, que idealiza a la cimentación que se asume sobre un medio semi-infinito, como un esquema de un resorte y un bloque rígido en movimiento, dependiendo del tipo de esfuerzos sobre la cimentación.

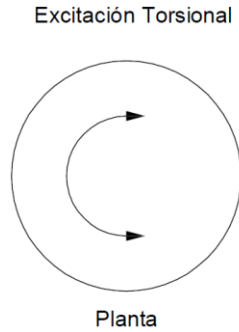


**IMAGEN 0.8 -Sistema Equivalente de Vibración Vertical (Hurtado)**

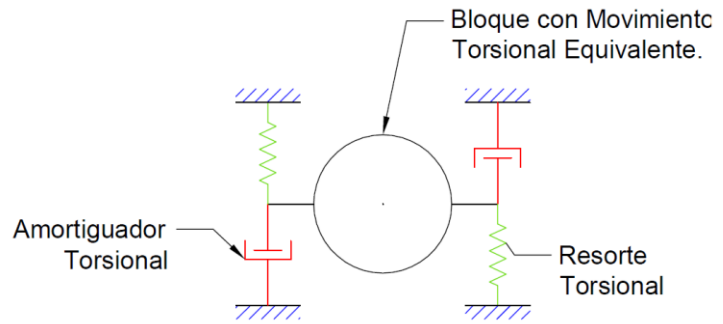


**IMAGEN 0.9 - Sistema Equivalente de Vibración Horizontal y de Cabeceo. (Hurtado)**

## CIMENTACIÓN REAL



## SISTEMA EQUIVALENTE



**IMAGEN 0.10 - Sistema Equivalente de Vibración Torsional. (Hurtado)**

Este método define el movimiento mediante la ecuación:

$$m\ddot{z} + \dot{z} + kz = P(t) \quad \text{Ec 0.22}$$

$m$  = Masa equivalente del sistema.

$C$  = Constante equivalente de mortiguamiento.

$K$  = Constante equivalente de la rigidez del sistema.

$P(t)$  = Fuerza excitadora en funcion del tiempo.

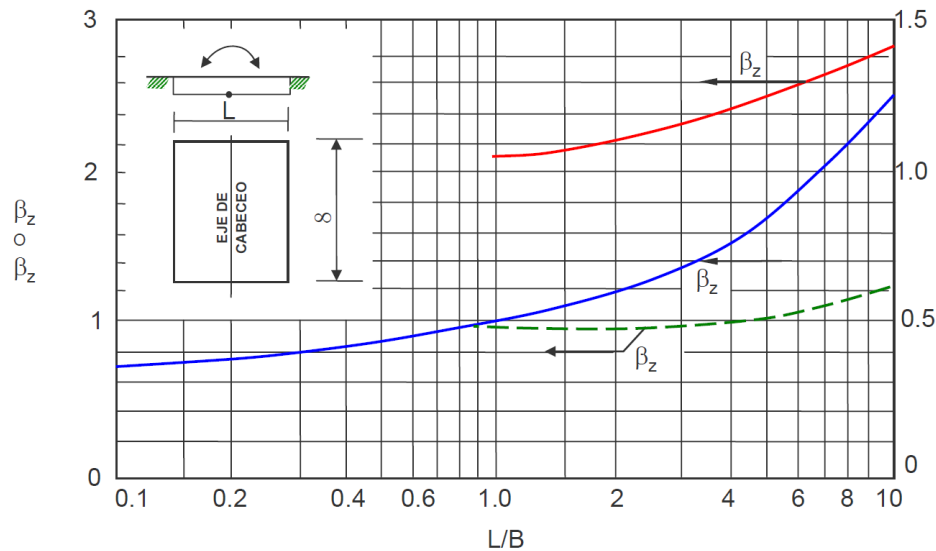
Para la aplicación de la ecuación (4.22) se define la constante  $k$  en función de la forma de la cimentación y el modo de vibración en la tabla 4.4.

**TABLA 0.4 - Constante de resorte equivalente para cimentaciones rígidas**

Modo de Vibración	Cimentación Circular	Cimentación Rectangular
Vertical	$k_z = \frac{4Gr_o}{1 - \nu\mu} \eta_z$	$k_z = \frac{G}{1 - \nu} \beta_z \sqrt{BL} \eta_z$
Horizontal	$k_x = \frac{32(1 - \nu)Gr_o}{7 - 8\nu} \eta_x$	$k_x = 2(1 + \nu)G\sqrt{BL} \eta_x$
Cabeceo	$k_\psi = \frac{8Gr_o^3}{3(1 - \nu)} \eta_\psi$	$k_\psi = \frac{G}{1 - \nu} \beta_\psi BL^2 \eta_\psi$
Torsional	$k_\theta = \frac{16Gr_o^3}{3}$	No existe (Use $r_o$ )

**Fuente: (Richart & Whitman , Comparison of Footing Vibration, Test with Theory., 1967)**

Las constantes de forma  $\beta_z, \beta_x, \beta_\psi$  se pueden determinar mediante la imagen 4.11.



**IMAGEN 0.11 - Constantes de forma para cimentaciones rectangulares.**  
Fuente: (Hurtado)

Las constantes de empotramiento ( $\eta_z, \eta_x, \eta_\psi$ ), así como el radio equivalente ( $r_o$ ), para determinar las constantes de resorte equivalentes se indican en la siguiente tabla. (Tabla 4.5)

**TABLA 0.5 - Coeficientes de empotramiento para constantes de resorte**

Modo de Vibración	$r_o$ para Cimentación Rectangular	Coeficiente
Vertical	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_z = 1 + 0.6(1 - \nu)(h/r_o)$
Horizontal	$\sqrt{BL/\pi}$	$\eta_x = 1 + 0.55(2 - \nu)(h/r_o)$
Cabeceo	$\sqrt[4]{BL^3/3\pi}$	$\eta_\psi = 1 + 1.20(1 - \nu)(h/r_o) + 0.20(2 - \nu)(h/r_o)^3$
Torsional	$\sqrt[4]{BL(B^2 + L^2)/6\pi}$	No existe

Fuente: (Whitman, 1972)

$h$  = Altura o profundidad de empotramiento

$L$  = Dimension horizontal perpendicular al eje de cabeceo

$B = \text{Dimension horizontal}$

$r_o = \text{Radio Equivalente}$

En la tabla 4.6 se expresa tanto la relación de inercias así como la relación de amortiguamiento.

**TABLA 0.6 - Relación de amortiguamiento equivalente para cimentaciones rígidas**

Modo de Vibración	Relacion de masa o de Inercia (B)	Relación de Amortiguamiento (D)
Vertical	$B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} \frac{W}{\gamma r_o^3}$	$D_z = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}} \alpha_z$
Horizontal	$B_x = \frac{(7 - 8\nu)}{32(1 - \nu)} \frac{W}{\gamma r_o^3}$	$D_x = \frac{0.288}{\sqrt{B_x}} \alpha_x$
Cabeceo	$B_\psi = \frac{3(1 - \nu)}{8} \frac{I_\psi}{\gamma r_o^5}$	$D_\psi = \frac{0.15\alpha_\psi}{(1 + n_\psi B_\psi)\sqrt{n_\psi B_\psi}}$
Torsional	$B_\theta = \frac{I_\theta}{\gamma r_o^3}$	$D_\theta = \frac{0.50}{1 + 2B_\theta}$

**Fuente: (Richart, Woods, & Hall, Vibrations of Soil Foundations., 1970)**

Los términos  $(\alpha_z, \alpha_x, \alpha_\psi)$  que se encuentran en la tabla 4.6 dependen de la profundidad de empotramiento de la cimentación y el modo de vibración de la misma. (Tabla 4.7)

**TABLA 0.7 - Efecto de la profundidad de empotramiento en la relación de amortiguamiento**

Modo de Vibración	Factor de empotramiento en D
Vertical	$\alpha_z = \frac{1 + 1.90(1 - \nu) \frac{h}{r_o}}{\sqrt{\eta_z}}$
Horizontal	$\alpha_x = \frac{1 + 1.90(2 - \nu) \frac{h}{r_o}}{\sqrt{\eta_x}}$
Cabeceo	$\alpha_\psi = \frac{1 + 0.70(1 - \nu) \frac{h}{r_o} + 0.60(2 - \nu) \left(\frac{h}{r_o}\right)^3}{\sqrt{\eta_\psi}}$

**Fuente: (Whitman, 1972)**

Se puede tener el caso en la proyección de cimentaciones para maquinaria en la que se debe plantear cimentaciones con formas arbitrarias, Dobry y Gazetas resumen los posibles valores de k y C considerando los modos de vibración de la cimentación y ciertos parametros en función de la forma de la misma.

**TABLA 0.8 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico.**

Modos de Vibración	Valores Estático o Pseudoestáticos de K		
	Forma General		
Vertical	$K_z = S_z \frac{2LG}{1 - \nu}$	$S_z = 0.8$ $S_z = 0.73 + 1.54 \left( \frac{A}{4L^2} \right)^{0.75}$	$\text{Para } \frac{A}{(4L)^2} < 0.02$ $\text{Para } \frac{A}{(4L)^2} > 0.02$
Horizontal y (Dirección Corta)	$K_y = S_y \frac{2LG}{2 - \nu}$	$S_y = 2.24$ $S_y = 4.5 \left( \frac{A}{4L^2} \right)^{0.38}$	$\text{Para } \frac{A}{(4L)^2} < 0.16$ $\text{Para } \frac{A}{(4L)^2} > 0.16$
Horizontal x (Dirección Larga)	$K_x = S_x \frac{2LG}{2 - \nu}$	$K_x = k_y - \frac{0.21LG}{0.75 - \nu} \left( 1 - \frac{B}{L} \right)$	
Cabeceo x (Dirección Corta)	$K_{rx} = S_{rx} \frac{G}{1 - \nu} (I_x)^{0.75}$	$S_{rx} = \frac{2.54}{(B/L)^{0.25}}$ $S_{rx} = 3.2$	$\text{Para } \frac{B}{L} < 0.4$ $\text{Para } \frac{B}{L} > 0.4$
Cabeceo y (Dirección Larga)	$K_{ry} = S_{ry} \frac{G}{1 - \nu} (I_y)^{0.75}$	$S_{ry} = 3.2$	
Torsión	$K_t = S_t G (J)^{0.75}$	$S_t = 3.8 + 10.7 \left( 1 - \frac{B}{L} \right)^{10}$	

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

**TABLA 0.9 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico**

Modos de Vibración	Valores Estáticos o Pseudoestáticos de K		
	Forma Circular	Corrida	Valor Dinámico
Vertical	$K_z = \frac{4GB}{1-\nu}$	$\frac{K_z}{2L} = \frac{0.8G}{1-\nu}$	-Usar grafica de rigidez dinámica $\bar{K}$ y K para cimentaciones circulares y corridas. -Usar grafica de rigidez vertical dinámica $K_z$ Vs. Frecuencia.
Horizontal y (Dirección Corta)	$K_y = \frac{8GB}{2-\nu}$	$\frac{K_y}{2L} = \frac{2.24G}{2-\nu}$	-Usar grafica de rigidez dinámica $\bar{K}$ y K para cimentaciones circulares y corridas. -Usar grafica de rigidez horizontal dinámica $K_f$ Vs. Frecuencia.
Horizontal x (Dirección Larga)	$K_x = \frac{8GB}{2-\nu}$		$K_y = \bar{K}_x$
Cabeceo x (Dirección Corta)	$K_{rx} = \frac{8GB^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{K_{rx}}{2L} = \frac{\pi GB^3}{2(1-\nu)} \left( 1 + \left[ \frac{\ln(3-4\nu)}{\pi} \right]^2 \right)$	-Usar grafica de rigidez dinámica $\bar{K}$ y K para cimentaciones circulares y corridas. -Usar grafica de rigidez dinámica por cabeceo $K_\alpha$ Vs. Frecuencia (Eje X)
Cabeceo y (Dirección Larga)	$K_{rx} = \frac{8GB^3}{3(1-\nu)}$		Usar grafica de rigidez dinámica $\bar{K}$ y K para cimentaciones circulares y corridas. -Usar grafica de rigidez dinámica por cabeceo $K_\eta$ Vs. Frecuencia (Eje Y)
Torsión	$K_{rx} = \frac{8GB^3}{3(1-\nu)}$		-Usar grafica de rigidez dinámica $\bar{K}$ y K para cimentaciones circulares y corridas. -Usar grafica de rigidez dinámica por torsión $K_\tau$ Vs. Frecuencia

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)



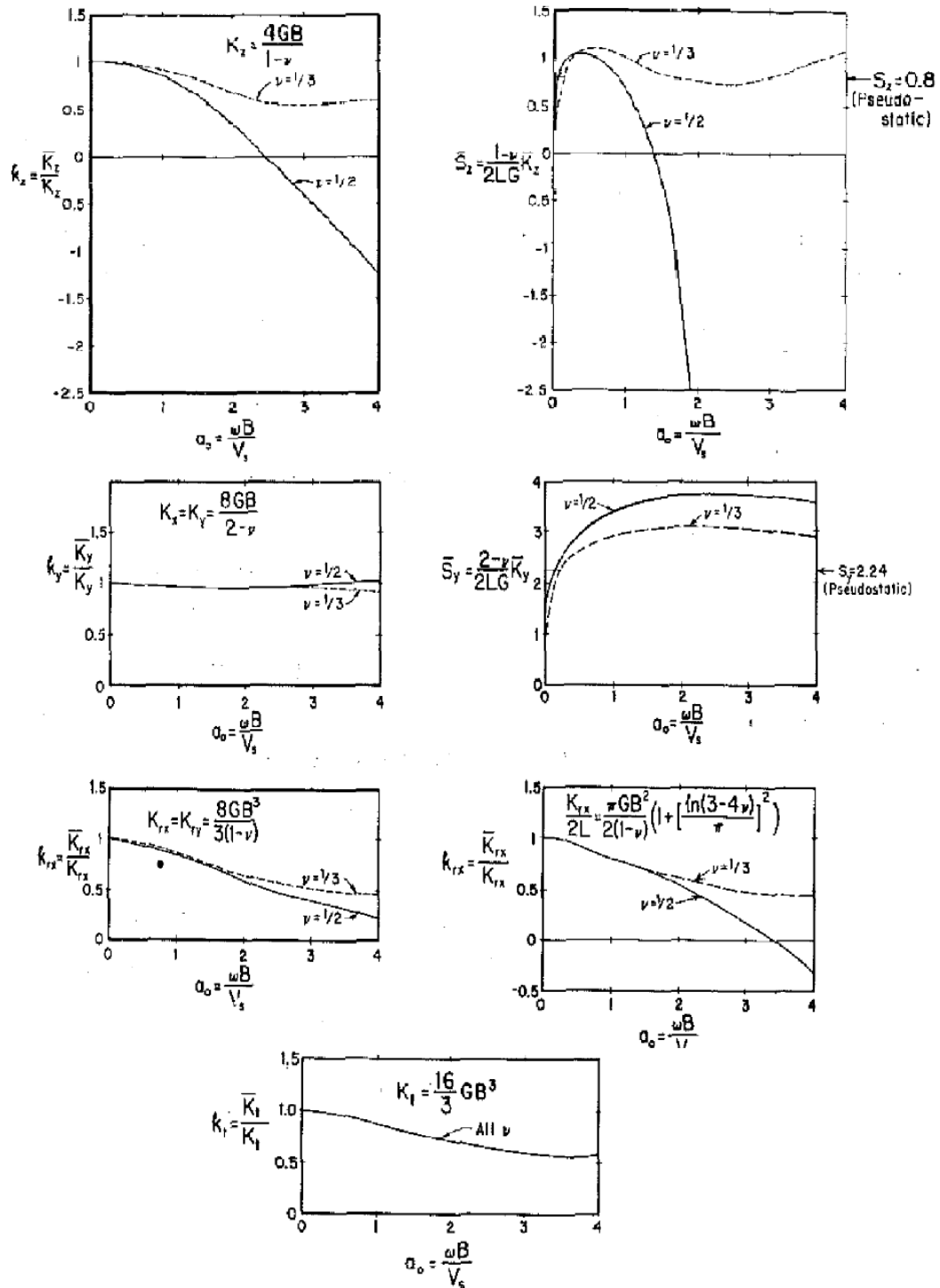
**TABLA 0.10 - Valores dinámicos de rigidez y amortiguamiento para formas arbitrarias para fundaciones de maquinarias en un espacio semi-elástico**

<b>Modos de Vibración</b>	<b>Relaciones de Amortiguamiento C</b>
Vertical	Usar Grafica de amortiguamiento vertical $C_z$ Vs. frecuencia
	Para altas frecuencias usar $C_z = \frac{3.4}{\pi(1-\nu)} \rho V_s A$
Horizontal y (Dirección Corta)	Usar Grafica de amortiguamiento vertical $C_y$ Vs. frecuencia
	Para altas frecuencias usar $C_y = \rho V_s A$
Horizontal x (Dirección Larga)	Para $\frac{L}{B} \leq 3$ usar $C_x = \bar{C}_x \rho V_s A$ con $\bar{C}_x = \bar{C}_y$
	Para $\frac{L}{B} = 3$ usar Grafica de amortiguamiento vertical $C_y$ Vs. Frecuencia
	Para $\frac{L}{B} > 3$ usar $C_x = \rho V_s A$
Cabeceo x (Dirección Corta)	Usar Grafica de amortiguamiento por cabeceo $C_{rx}$ Vs. frecuencia
	Para altas frecuencias usar $C_{rx} = \frac{3.4}{\pi(1-\nu)} \rho V_s I_x$
Cabeceo y (Dirección Larga)	Usar Grafica de amortiguamiento por cabeceo $C_{ry}$ Vs. frecuencia
	Para altas frecuencias usar $C_{ry} = \frac{3.4}{\pi(1-\nu)} \rho V_s I_y$
Torsión	Usar Grafica de amortiguamiento por torsión $C_t$ Vs. frecuencia
	Para altas frecuencias usar $C_t = \rho V_s J$

**Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)**

Para determinar el valor de los parámetros de k y C se utilizan los siguientes ábacos propuestos por los autores Dobry y Gazetas.

IMAGEN 0.12 - Valores de Rigidez Estática ( $K$ ) y Dinámica ( $\bar{K}$ ) para Cimentaciones Corridas y Circulares



Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986).

Los valores de  $S_z$  se pueden obtener mediante la tabla 4.11, determinando el valor en función de la forma de la cimentación y la relación de su largo vs su ancho.

**TABLA 0.11 - Valores de  $S_z$  para las diferentes formas de cimentación**

FORMA	$L/B$	$A/(4L^2)$	$s_z = \frac{1-\nu}{2GL} K_z$	Referencia para $K_z$
Cuadrada	1	1.00	2.28 (2.13-2.44)	1.8, 17, 33
Circular	1	0.79	2.01	$K_z = \frac{4GB}{1-\nu}$
Hexagonal (Regular)	1	0.65	1.84	3
Rectangular	2	0.50	1.65 (1.55-1.80)	3
Triangular (Equilátera)	1.15	0.44	1.59	3
Elipsoidal	2	0.39	1.46	3
Semicircular	2	0.39	1.49	3
Elipsoidal	3	0.26	1.24	3
Triangular (45°/ 45°/ 90°)	2	0.25	1.24	3
Romboidal (60°)	2	0.25	1.21	3
Rectangular	4	0.25	1.27	3
Triangular (30°/ 60°/ 90°)	2.3	0.22	1.18	3
Romboidal (45°)	2.4	0.21	1.18	3
Elipsoidal	4	0.20	1.13	3
Romboidal (30°)	3.7	0.14	1.06	3
Elipsoidal	6	0.13	0.99	3
Rectangular	8	0.13	0.98	3.17
Rectangular	10	0.10	0.91	1.17
Rectangular	20	0.05	0.78	3.34
Alargada		0.00	0.80	*
* $S_z = 0.80$ para cimentaciones de tipo alargadas, siendo este un valor Pseudoestáticos.				

**Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)**

La imagen 4.13 identifica el parámetro de rigidez dinámica vertical ( $\bar{K}$ ) vs la frecuencia específica de cada cimentación, que se determina en función de su forma.

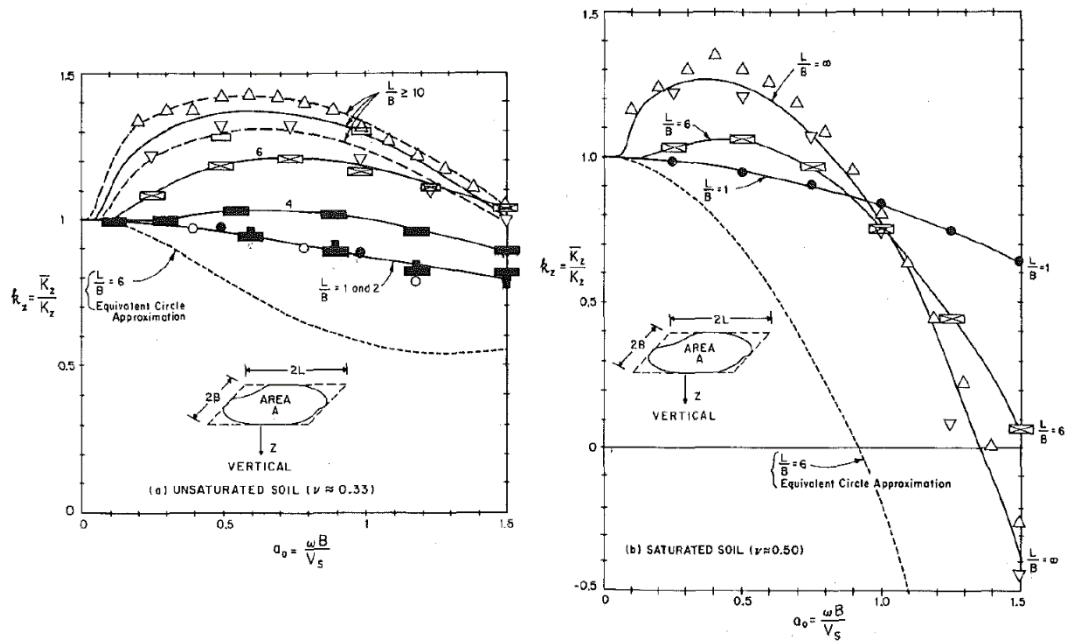


IMAGEN 0.13 - Valores de Rigidez Vertical Dinámica  $\bar{K}$

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

En la siguiente imagen se puede observar una comparación entre los valores de rigidez horizontal estática ( $K_y$ ,  $K_z$ ) y la forma de la cimentación.

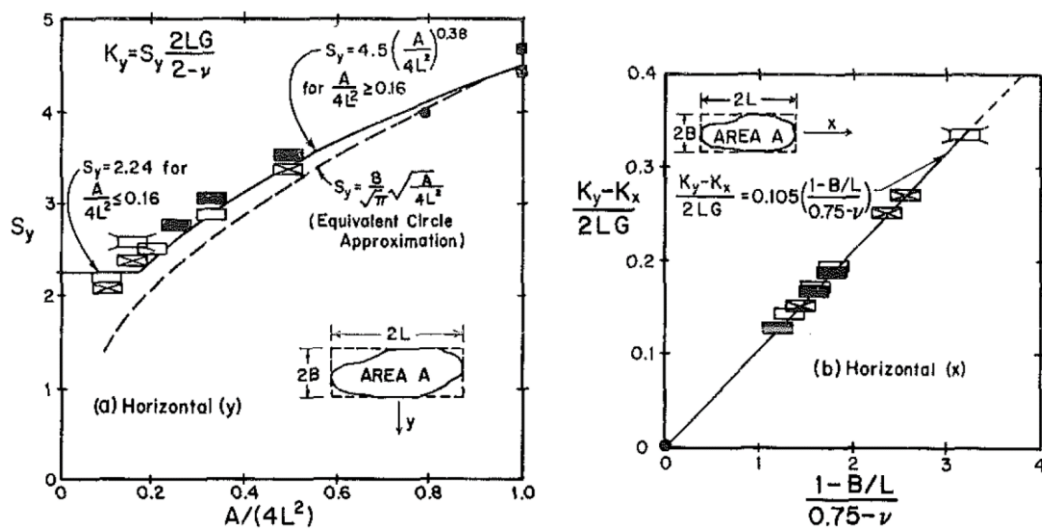
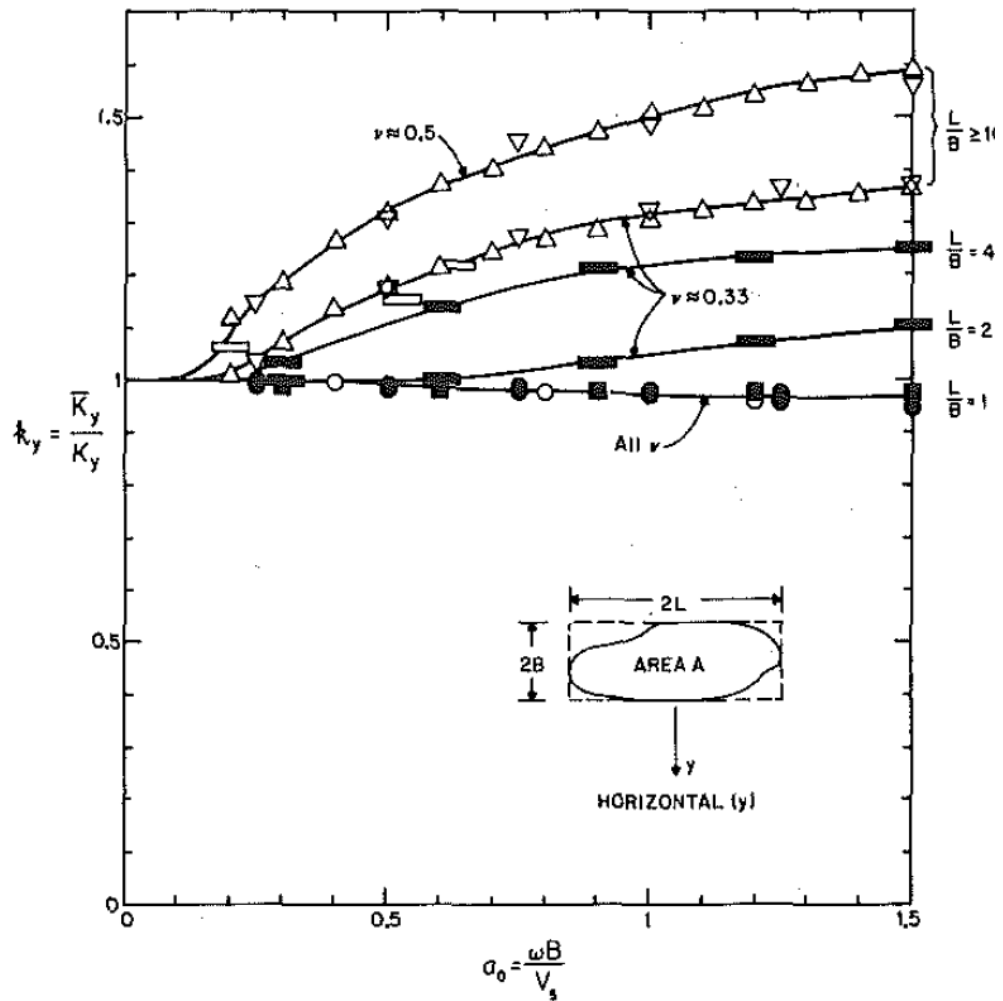


IMAGEN 0.14 - Valores de Rigidez Horizontal Estática  $K_y$ ,  $K_z$

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

La imagen 4.15 presenta una gráfica en la que se puede determinar el valor de la rigidez dinámica en sentido horizontal ( $\bar{K}_y$ ) en función de la frecuencia específica de una cimentación.



**IMAGEN 0.15 - Coeficientes de Rigidez Dinámica Horizontal  $\bar{K}_y$**

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

De la misma manera para el efecto de cabeceo existen valores de rigidez propios de este fenómeno, exclusivos de las acciones dinámicas. La siguiente grafica expone los valores de  $\bar{K}_{ry}$  y  $\bar{K}_{rx}$  que se encuentran en función de la frecuencia del movimiento.

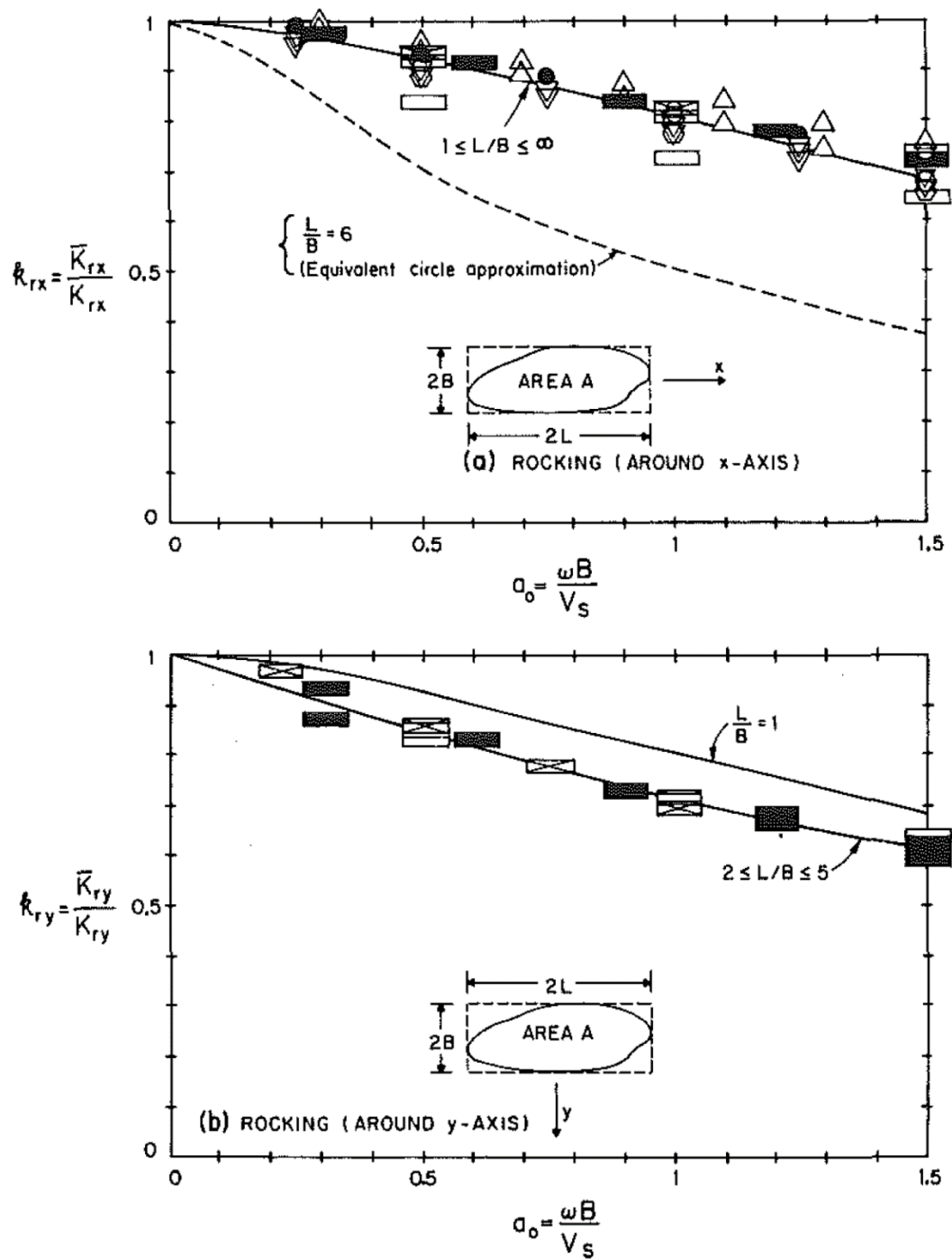
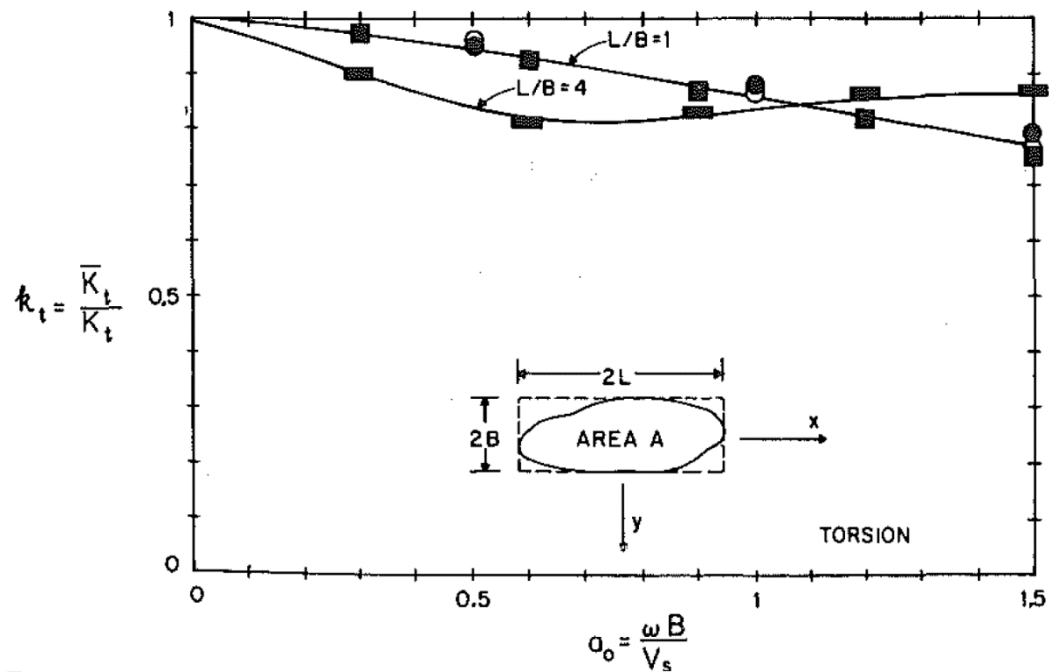


IMAGEN 0.16 - Valores de Rigidez Dinámica para el Cabeceo  $\bar{K}_{ry}$  y  $\bar{K}_{rx}$

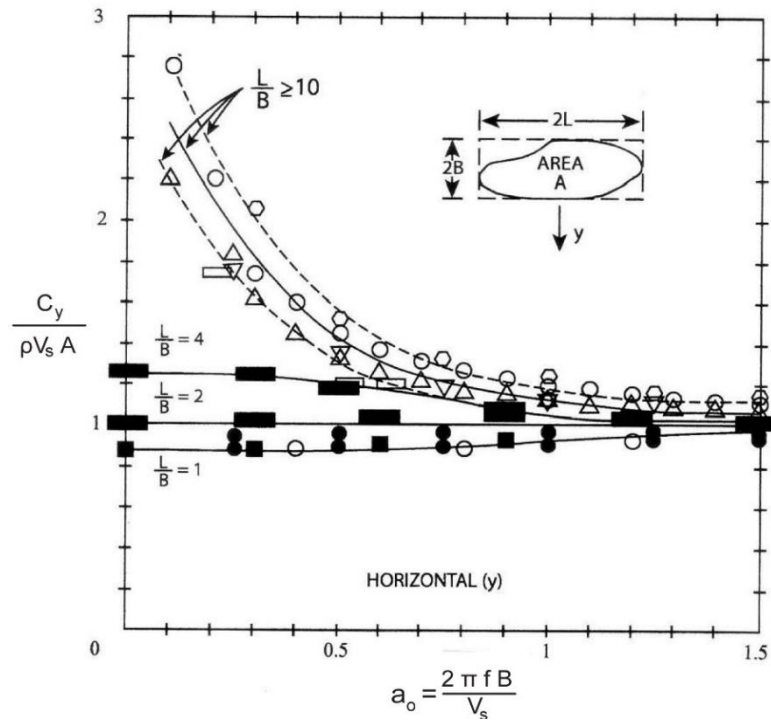
Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

Para el efecto de torsión los valores de la rigidez dinámica se expresan en la imagen 4.17.



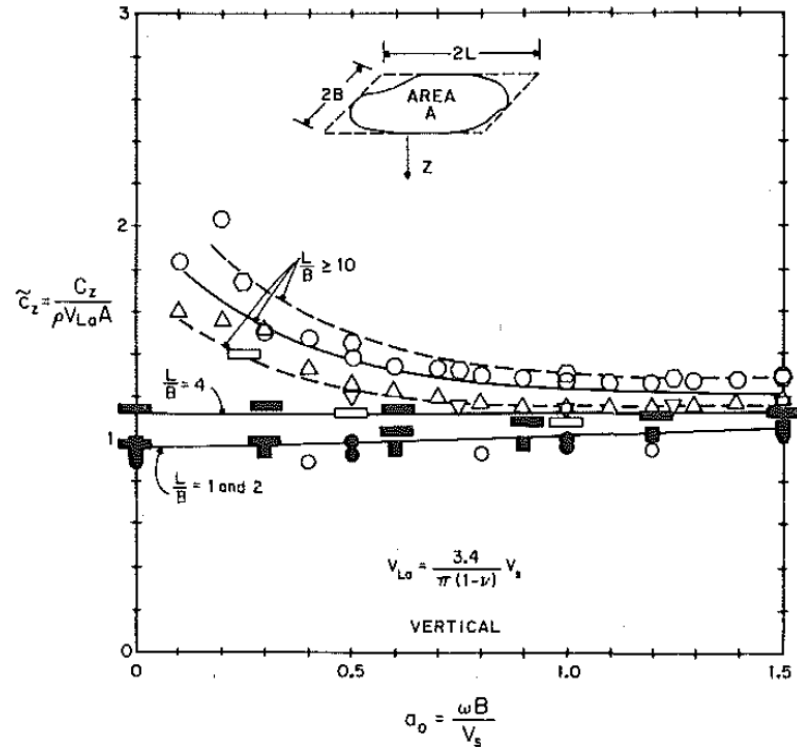
**IMAGEN 0.17 - Valores de la Rigidez en la Torsión  $\bar{K}_t$**   
Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

Al igual que con la rigidez  $k$ , Dobry y Gazetas proponen ábacos para la determinación de los factores de amortiguamiento para los casos de movimiento horizontal, vertical, torsional y de cabeceo en función de la frecuencia del movimiento para diferentes formas de la cimentación en estudio.



**IMAGEN 0.18 - Valores de Amortiguamiento Horizontal  $C_y$**

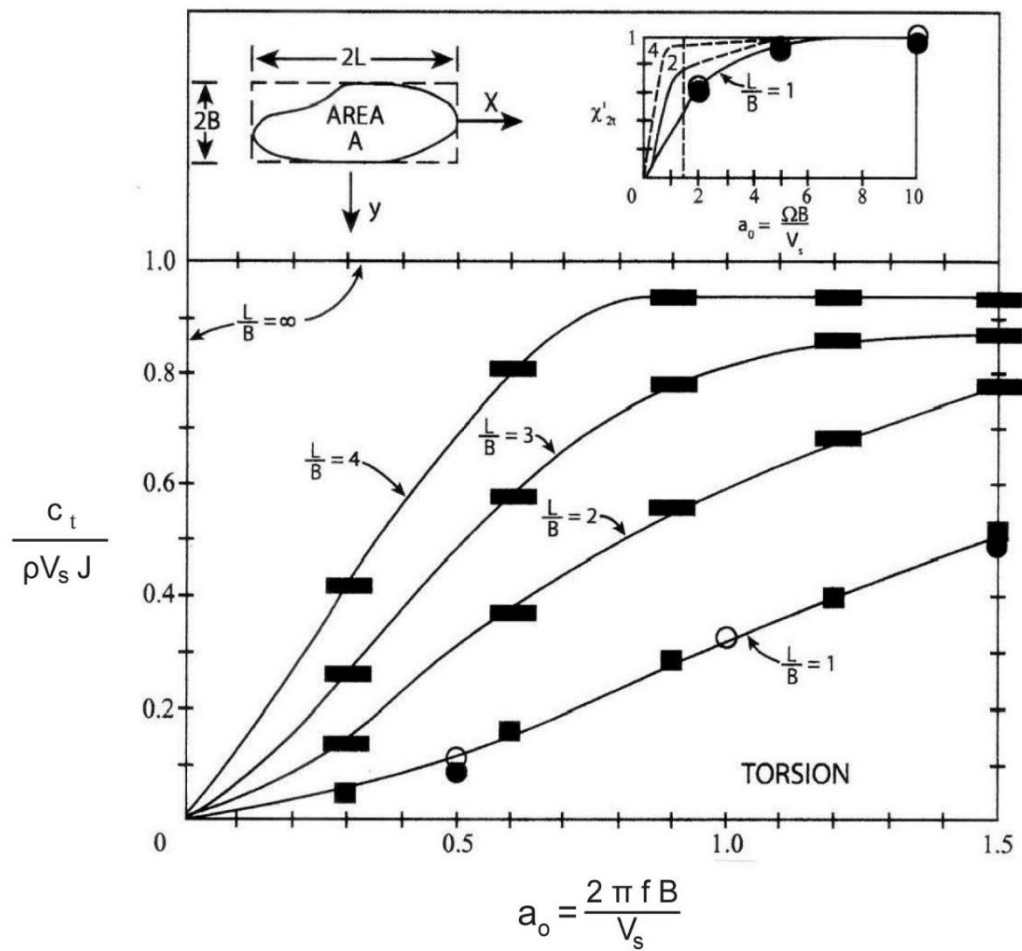
Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)



**IMAGEN 0.19 - Amortiguamiento Vertical  $C_z$**

Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)





**IMAGEN 0.20 - Valores de Amortiguamiento para Movimientos Torsionales  $C_t$**   
Fuente: (Dobry & Gazetas, 1986)

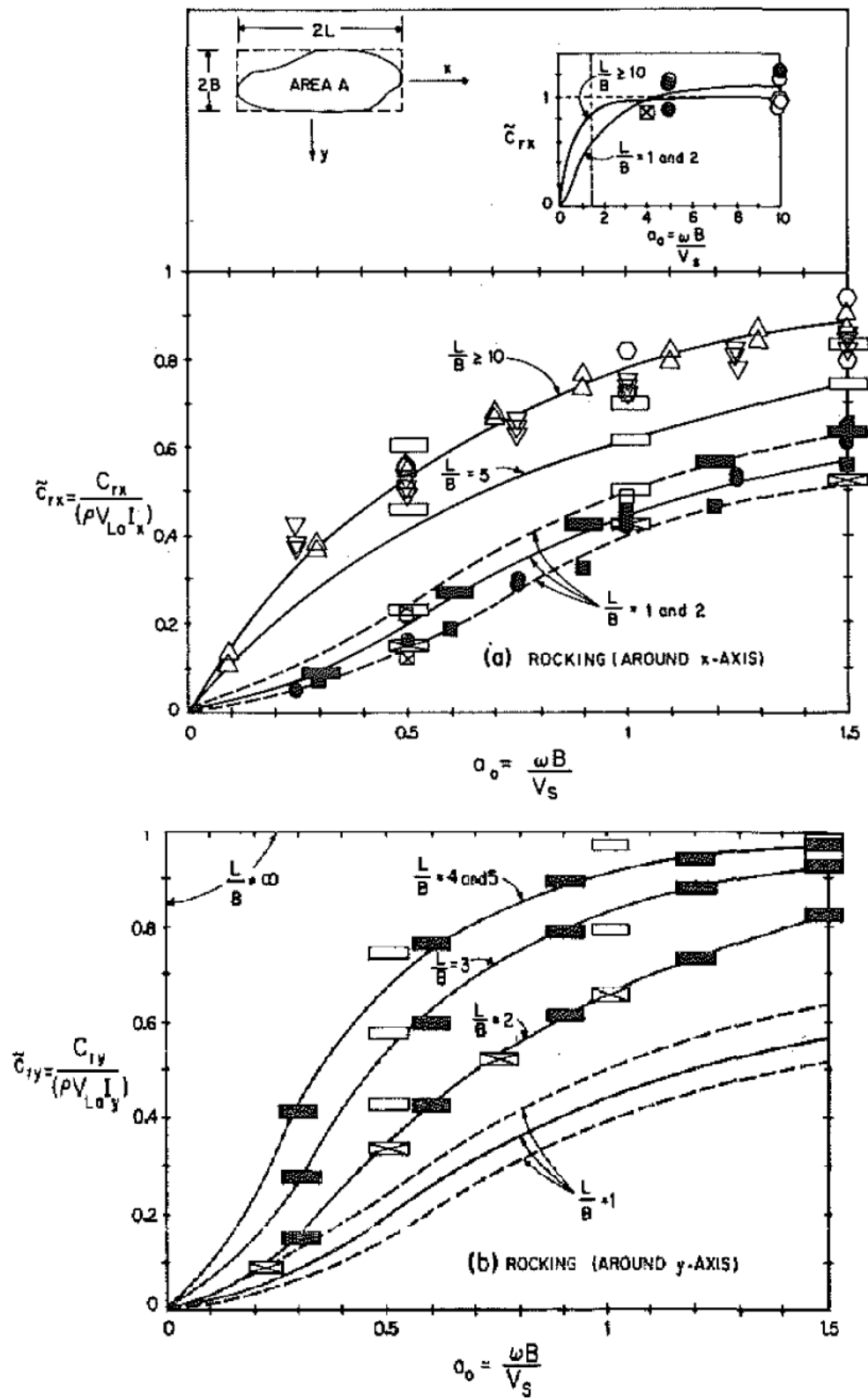


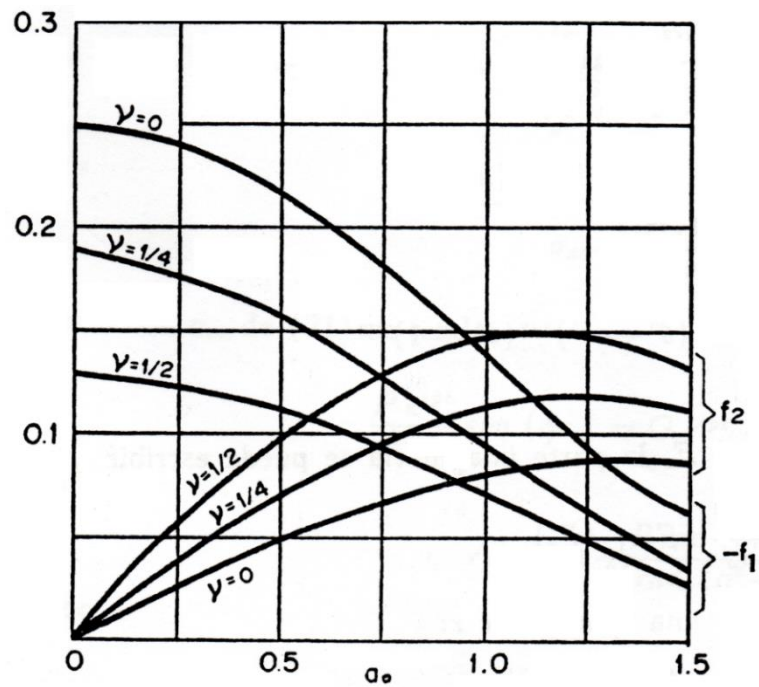
IMAGEN 0.21 - Amortiguamiento para Efectos de Cabeceo  
(Dobry & Gazetas, 1986)

### 4.3 Desplazamientos y rotaciones

En el diseño de una cimentación para maquinaria se requiere controlar los posibles desplazamientos que sufrirá todo el sistema máquina-cimentación, se han planteado fórmulas que determinan los desplazamientos verticales, horizontales y rotacionales a partir de un eje específico.

Empleando procesos matemáticos, análogos a la integración, de las ecuaciones del movimiento se plantean soluciones para los desplazamientos y rotaciones de una placa de cimentación; los desplazamientos verticales son caracterizados mediante la ecuación 4.23, determinada a partir de considerar la cimentación como una placa rígida bajo una excitación periódica, en la que los factores de cálculo  $f_1$  y  $f_2$  pueden obtenerse de las curvas mostradas en la imagen 4.22.

$$w_m = \frac{Pe^{ipt}}{Gr_o}(f_1 + if_2) \quad \text{Ec 0.23}$$

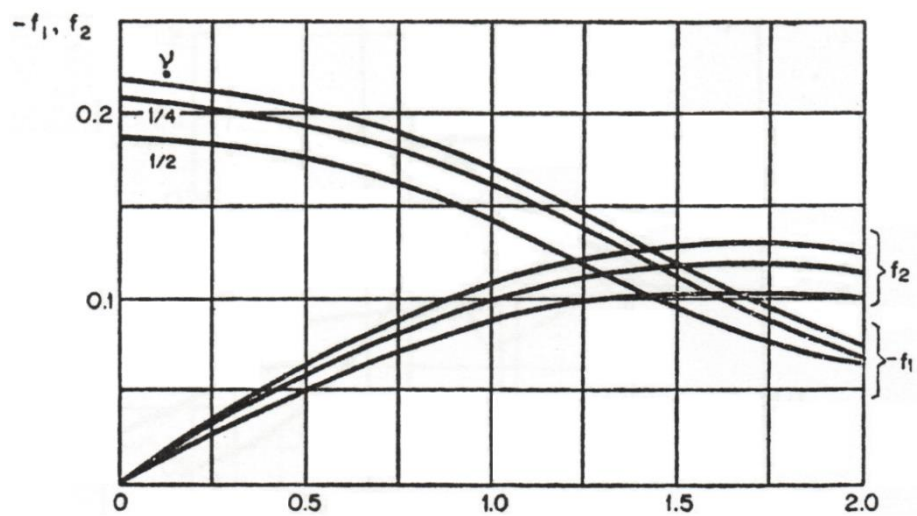


**IMAGEN 0.22 - Desplazamiento Vertical.**  
Fuente: (Salazar Resines, 1969)

Para desplazamientos horizontales se utiliza la siguiente ecuación:

$$u_m = \frac{Pe^{ipt}}{Gr_o} (f_1 + if_2) \quad \text{Ec 0.24}$$

Los factores  $f_1$  y  $f_2$  se pueden determinar en la siguiente imagen 4.23:



**IMAGEN 0.23 - Desplazamiento Horizontal.**  
Fuente: (Salazar Resines, 1969)

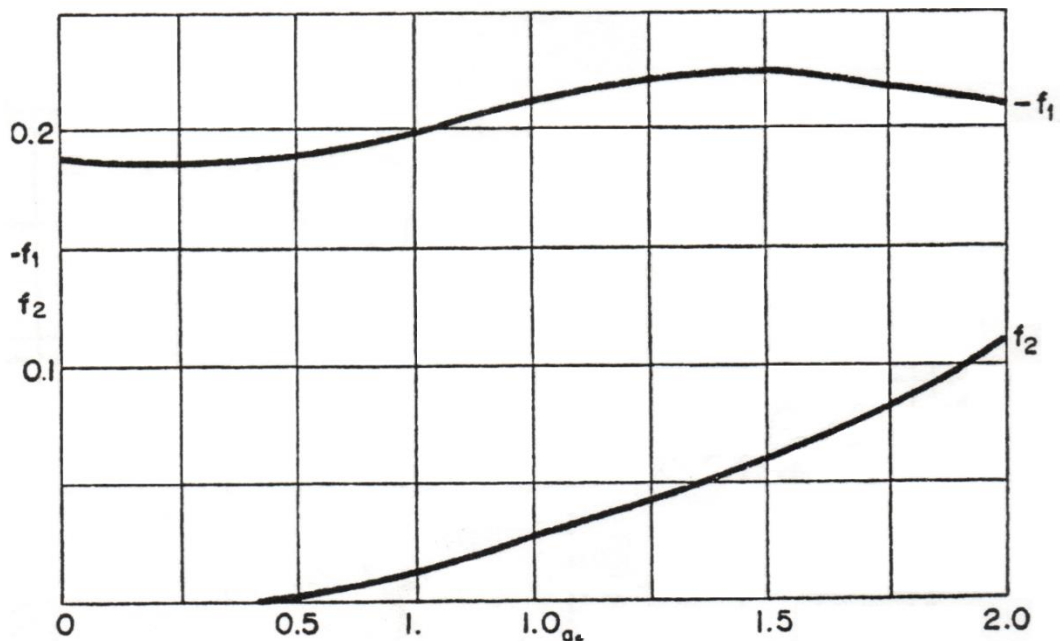
Los desplazamientos rotacionales pueden expresarse mediante la ecuación 4.25 sin importar si son respecto al eje horizontal o vertical.

$$\phi = \frac{Me^{ipt}}{Gr_o^3} (f_1 + if_2) \quad \text{Ec 0.25}$$

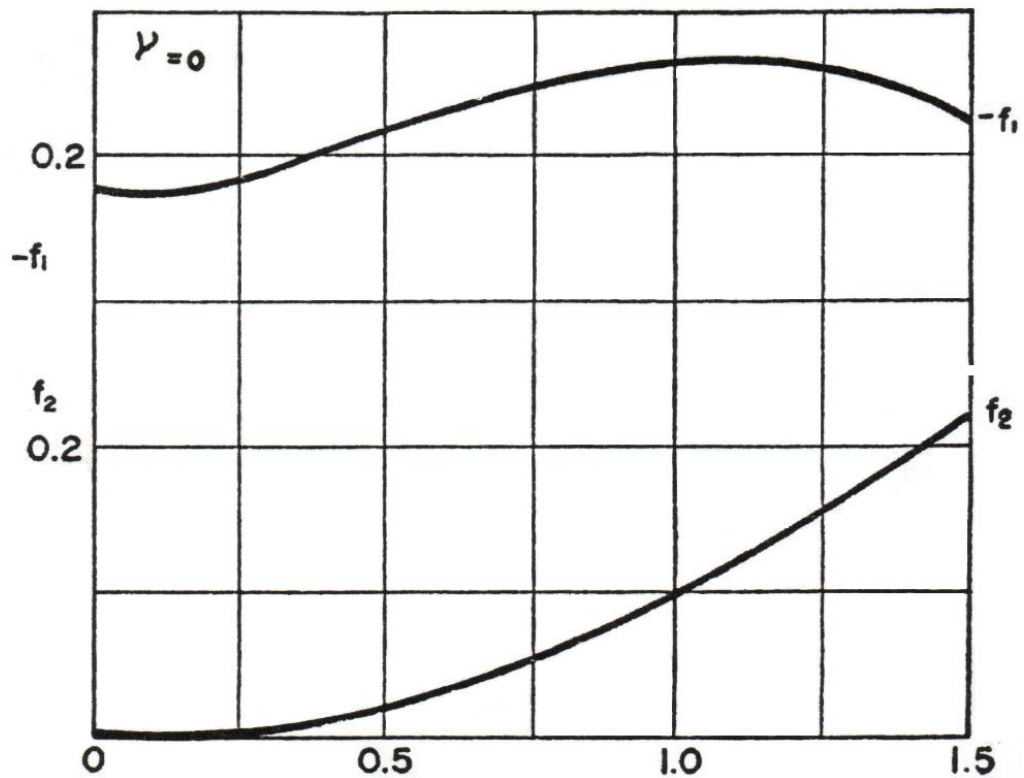
$\phi$  = Es el desplazamiento angular.

$M$  = Momento alrededor de el eje del que se requiere determinar el desplazamiento.

$f_1$  y  $f_2$  se determinan las imágenes 4.24 y 4.25, para rotaciones respecto a un eje vertical y un eje horizontal respectivamente.



**IMAGEN 0.24 - Rotaciones alrededor de un eje Vertical.**  
Fuente: (Salazar Resines, 1969)



**IMAGEN 0.25 - Rotaciones alrededor de un eje Horizontal.**  
Fuente: (Salazar Resines, 1969)

Se requiere la utilización de variables adimensionales como el factor de frecuencia expresado como:

$$a_o = kr_o \quad \text{Ec 0.26}$$

La velocidad de ondas transversales es caracterizada por la expresión:

$$C_s = \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad \text{Ec 0.27}$$

Donde,

$\rho$  = Es la densidad del suelo sobre el que se localiza la cimentación.

$G$  = Modulo de corte del suelo.

Mediante la ecuación 4.28 se pueden estimar las amplitudes de los desplazamientos verticales u horizontales del movimiento:

$$A = \frac{P}{\sqrt{(K - p^2 m) + (p Q)^2}} \quad \text{Ec 0.28}$$

Para la ecuación 4.28 se requiere definir el factor b,

$$b = \frac{m_o}{\rho r_o^3} \quad \text{Ec 0.29}$$

Siendo  $m_o$  la masa de la cimentación.

Se presenta la tabla (4.12) que expresa las amplitudes máximas permisibles del movimiento en función de la velocidad de operación considerando cada tipo de maquinaria.

**TABLA 0.12 - Amplitudes Permisibles.**

TIPO	Amplitudes Permisibles (cm)	
Equipo de baja velocidad (< 500rpm)	0.02	0.025
Cimentación para martillos	0.2	0.12
*Equipos de alta velocidad		
- . Con Velocidades mayores a 1500 rpm y menores a 3000 rpm.		
Vibraciones Verticales	0.002	0.003
Vibraciones Horizontales	0.004	0.005
- . Con Velocidades mayores a 500 rpm y menores a 1500 rpm.		
Vibraciones Verticales	0.004	0.006
Vibraciones Horizontales	0.007	0.009

Las amplitudes del movimiento de rotación tanto vertical como horizontal se pueden determinar gracia a la ecuación:

$$\phi = \frac{M}{Gr_o} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 + b' a_o^2 f_1)^2 + (b' a_o^2 f_1)^2}} \quad \text{Ec 0.30}$$

Done el factor b' se define por la expresión:  $b' = \frac{I_o}{\rho r_o^5}$

Dentro del estudio de los desplazamientos y rotaciones de una cimentación se puede determinar además, constantes para cada uno de estos casos, por lo cual se utilizan las expresiones 4.31 y 4.32 para los desplazamientos lineales y las expresiones 4.33 y 4.34 para el caso de la rotación. Contemplando que para la utilización de cada una de estas expresiones se requiere de las constantes correspondientes para cada caso que se pueden determinar en las imágenes 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25.

$$Q = \frac{Gr_v}{p} * \frac{f_2}{f_1^2 + f_2^2} \quad \text{Ec 0.31}$$

$$K = -Gr_o \frac{f_2}{f_1^2 + f_2^2} \quad \text{Ec 0.32}$$

$$H = \frac{Gr_o^3}{p} * \frac{f_2}{f_1^2 + f_2^2} \quad \text{Ec 0.33}$$

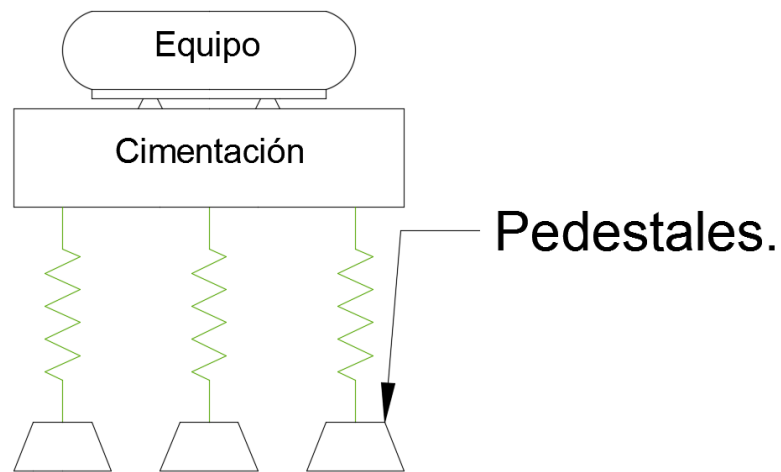
$$S = -Gr_o^3 \frac{f_2}{f_1^2 + f_2^2} \quad \text{Ec 0.34}$$

#### 4.4 Amortiguadores.

Existen casos especiales ocasionados por características específicas del medio, en los que se requiere que las amplitudes de las vibraciones sean menores a las que normalmente se consideran admisibles.

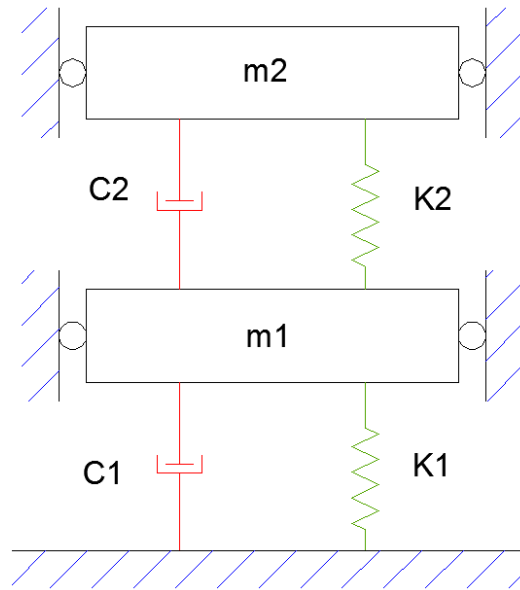


Para conseguir este requerimiento cuando los métodos comunes no son suficientes (Aumento del área de la base, aumento de desbanque, etc.), se recomienda la ubicación de amortiguadores de bajo de la cimentación. Los amortiguadores comúnmente utilizados, por las ventajas económicas que representan, son resortes ubicados sobre pedestales aislados o en una losa delgada llamada “Plato único” que descansa directamente sobre el suelo.



**IMAGEN 0.26 - Cimentación con amortiguadores.**

El uso de resortes bajo el bloque de la cimentación resulta en un sistema de dos masas soportadas en dos resortes, imagen 4.28. Al analizar la imagen mencionada se observa que las masas rígidas  $m_1, m_2$  poseen 6 GDL cada una, lo que equivale a un sistema con 12 GDL. Por motivos prácticos se considera que las vibraciones en el sentido vertical son las únicas presentes en el sistema, por lo que se reduce a un sistema de 2 GDL.



**IMAGEN 0.27 - Esquema de Cimentación Bajo Resortes.**

$m_2$  = Masa total del sistema (masa del bloque de cimentación  
+ masa del equipo)

$m_1$  = Masa del bloque de cimentación.

$k_2$  = Rigidez del juego de resortes.

$k_1$  = Rigidez del suelo.

Al considerar una fuerza excitadora  $P_o \sin(Wt)$  sobre la masa  $m_2$ , las expresiones 4.50 y 4.51 especifican las amplitudes de las masas  $m_1$  y  $m_2$  respectivamente.

$$a_1 = \frac{\overline{W_{n2}^2}}{m_1 f(W_m^2)} * P_o \quad \text{Ec 0.35}$$

$$a_2 = \frac{[(1 + \alpha)\overline{W_{n1}^2} + \alpha \overline{W_{n2}^2} - W^2]}{m_2(W^2)} * P_o \quad \text{Ec 0.36}$$

Donde:

$$\overline{W_{n2}^2} = \frac{k_2}{m_2}$$

$$\overline{W_{n1}^2} = \frac{k_1}{m_1 + m_2}$$

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1}$$

$$f(W_m^2) = W^4 - (1 + \alpha)(\overline{W_{n1}^2} + \overline{W_{n2}^2})W^2 + (1 + \alpha)(\overline{W_{n1}^2} * \overline{W_{n2}^2})$$

La fuerza excitadora  $P_o$  es proporcional al cuadrado de la frecuencia del equipo multiplicada por un factor  $\gamma$  que depende de las características de la maquinaria y es proporcionado por el proveedor.

$$P_o = \gamma W^2 \quad \text{Ec 0.37}$$

Si se considera que:

$$\eta_1 = \frac{\overline{W_{n1}}}{W} \quad \text{Ec 0.38}$$

$$\eta_2 = \frac{\overline{W_{n2}}}{W} \quad \text{Ec 0.39}$$

Y se remplazan las ecuaciones 4.52, 4.53 y 4.54 en la expresión 4.50 se obtiene:

$$a_1 = \frac{\gamma}{m_1} \left[ \frac{\eta_2^2}{1 - (1 + \alpha)(\eta_1^2 + \eta_2^2 - \eta_1^2 \eta_2^2)} \right] \quad \text{Ec 0.40}$$

Si no existen disipadores de energía la amplitud de la cimentación se expresa como:

$$a_z = \frac{P_o}{(m_1 + m_2)(\overline{W_{n1}^2} - W^2)} \quad \text{Ec 0.41}$$

En términos de  $\gamma$  y  $\alpha$ ,  $a_z$  resulta:

$$a_z = \frac{\gamma}{m_1} \left( \frac{1}{1 - \alpha} \right) \left( \frac{1}{\eta_1^2 - 1} \right) \quad \text{Ec 0.42}$$

Se puede determinar también el grado de absorción de la cimentación mediante la expresión:

$$\beta = \frac{a_z}{a_1} = \frac{1 - (1 + \alpha)(\eta_1^2 + \eta_2^2 - \eta_1^2 \eta_2^2)}{(1 + \alpha)(\eta_1^2 - 1)\eta_2^2} \quad \text{Ec 0.43}$$

Los amortiguadores son efectivos cuando  $\beta \leq -1.0$ , es decir, cuando se cumple la igualdad  $0 \leq \eta_2 \leq \eta_o$  para lo cual:

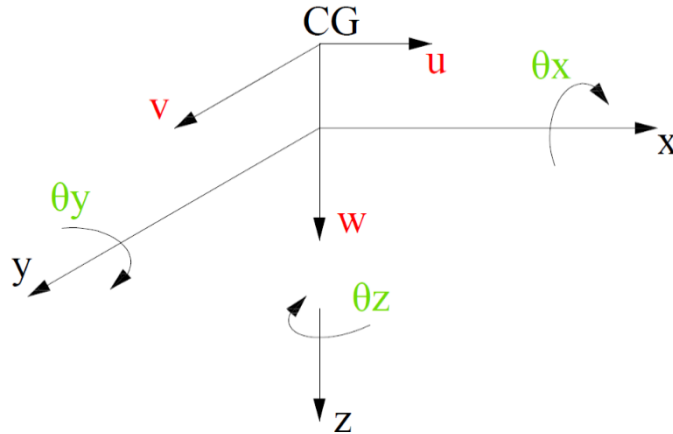
$$\eta_o = \sqrt{\frac{(1 + \alpha)\eta_1^2 - 1}{2(1 + \alpha)(\eta_1^2 - 1)}} \quad \text{Ec 0.44}$$

Si se conoce el grado de absorción ( $\beta$ ),  $\eta_2$  se obtiene como:

$$\eta_2^2 = \frac{1 - (1 + \alpha)\eta_1^2}{(1 + \alpha)(\beta - 1)(\eta_1^2 - 1)} \quad \text{Ec 0.45}$$

#### 4.5 Ecuaciones de equilibrio para sistemas de seis grados de libertad.

Considerando un sistema dinámico de seis posibles movimientos (traslacionales y rotacionales) se puede plantear las siguientes ecuaciones de equilibrio; tomando en consideración el sistema de referencia a partir del centro de gravedad (CG) planteado en la imagen 4.26 para su determinación.



**IMAGEN 0.28 - Sistema de Referencia para seis grados de libertad. (Luca Limaico)**

$$m\ddot{u} = R_x + F_x \quad \text{Ec 0.46}$$

$$m\ddot{v} = R_y + F_y \quad \text{Ec 0.47}$$

$$m\ddot{w} = R_z + F_z \quad \text{Ec 0.48}$$

$$I_x\ddot{\theta}_x = T_x + M_x + z_A R_y - y_A R_z \quad \text{Ec 0.49}$$

$$I_y\ddot{\theta}_y = T_y + M_y + x_A R_z - z_A R_x \quad \text{Ec 0.50}$$

$$I_z\ddot{\theta}_z = T_z + M_z + y_A R_x - x_A R_y \quad \text{Ec 0.51}$$

En las ecuaciones planteadas (4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 y 4.40):

$F_x, F_y, F_z$  = Fuerzas desbalanceadas en direccion de los ejes.

$M_x, M_y, M_z$  = Momentos desbalanceados alrededor de los ejes.

$R_x, R_y, R_z$  y  $T_x, T_y, T_z$

= Reacciones totales sobre el area de contacto de la cimentación.

$$R_x = -Q_h \dot{u}_A - K_h u_A \quad \text{Ec 0.52}$$

$$R_y = -Q_h \dot{v}_A - K_h v_A \quad \text{Ec 0.53}$$

$$R_z = -Q_v \dot{w}_A - K_v w_A \quad \text{Ec 0.23}$$

$$T_x = -H_h \dot{\theta}_x - S_h \theta_x \quad \text{Ec 0.55}$$

$$T_y = -H_h \dot{\theta}_y - S_h \theta_y \quad \text{Ec 0.56}$$

$$T_z = -H_h \dot{\theta}_z - S_v \theta_z \quad \text{Ec 0.57}$$

A partir de estas expresiones se logra obtener las ecuaciones de equilibrio dinámico en el centro de gravedad del sistema maquinaria-cimentación.

$$R_x = -Q_h(\dot{u}_g + x_A \dot{\theta}_z - z_A \dot{\theta}_y) - K_h(u_g + x_A \theta_z - z_A \theta_y) \quad \text{Ec 0.58}$$

$$R_y = -Q_h(\dot{v}_g + z_A \dot{\theta}_x - x_A \dot{\theta}_z) - K_h(v_g + z_A \theta_x - x_A \theta_z) \quad \text{Ec 0.59}$$

$$R_z = -Q_v(\dot{w}_g + x_A \dot{\theta}_y - y_A \dot{\theta}_x) - K_v(w_g + x_A \theta_y - y_A \theta_x) \quad \text{Ec 0.60}$$

#### 4.6 Parámetros especiales a considerar en la etapa de planificación.

Las dimensiones de la cimentación deben ser tales que, la frecuencia natural de la misma se aleje del valor de la frecuencia de operación de la maquinaria, considerando su velocidad de operación.

La cimentación de una maquinaria debe plantearse con una base grande y un peso pequeño para obtener una frecuencia natural alta, para estos casos se recomienda cimentaciones tipo cajón o bloque. Por el contrario si se requiere sustentaciones con una frecuencia natural baja, se debe proyectar estructuras masivas o bastante voluminosas, o a su vez considerar soportarlas sobre resortes u otros dispositivos similares.

A continuación se presenta un resumen del tipo de cimentación recomendada en función de la velocidad de operación de la maquinaria:

**TABLA 0.13 - Cimentación recomendada en función de la velocidad. (Hurtado)**

Velocidad	Tipo de Cimiento	Frecuencia Admisible
Baja $W_o < 500 \text{ rpm.}$	Cimiento de Alta frecuencia	La primera frecuencia natural debe ser de 40 % a 50 % mayor que la frecuencia de operación del equipo.
Intermedia $500 \text{ rpm} < W_o < 1000 \text{ rpm.}$	Cimiento de Alta o Baja frecuencia.	La primera frecuencia natural debe ser de 40% a 50% más pequeña que la frecuencia de excitación en cimentaciones de baja frecuencia o 40% a 50% mayor en el caso de cimentaciones de alta frecuencia.
Alta $W_o > 1000 \text{ rpm}$	Cimientos de Baja frecuencia	La frecuencia natural inicial del sistema debe ser de 40% a 50% más baja que la frecuencia del equipo.

Los fabricantes del equipo a sustentar generalmente proporcionan las dimensiones de la cimentación, la altura de la misma está dada en función del tipo de suelo encontrado en el lugar y los niveles de operación del equipo.

Recomendaciones para la planificación de cimentaciones para equipo dinámico:

- ✓ La excentricidad existente entre el centro de gravedad del equipo y el centroide del área de la cimentación no deberá ser mayor al 5% respecto a las dimensiones de la misma.
- ✓ Para evitar la transmisión de vibraciones a estructuras adyacentes es necesario dejar un boquete en el perímetro exterior de la cimentación.
- ✓ Con el fin de disminuir los efectos de las amplitudes horizontales se requiere definir la menor altura posible de la cimentación.

- ✓ En la medida de lo posible es recomendable escoger la mayor dimensión viable en la base de la dirección del momento oscilatorio.

#### **4.7 Datos de diseño necesarios.**

El fabricante debe proveer al diseñador de la cimentación de los siguientes datos:

- ✓ Velocidad y potencia nominal del equipo.
- ✓ Magnitud y posición de las cargas estáticas.
- ✓ Magnitud y ubicación de las acciones dinámicas que se producen durante la operación de la maquinaria.
- ✓ Datos para la determinación y cálculo de fuerzas excitadoras.
- ✓ Posición y dimensiones de las aberturas necesarias en la cimentación para pernos, controladores, tuberías, instalaciones, etc.
- ✓ Información adicional específica del equipo entre la que se puede mencionar: asentamientos admisibles, amplitudes máximas, etc.

#### **4.8 Ejemplo de aplicación.**

A continuación se presenta un modelo sencillo desarrollado de manera analítica para la aplicación de la teoría anteriormente expuesta:

Se desea verificar las amplitudes de vibración vertical y cabeceo para un compresor cimentado en un bloque de concreto, imagen.

Las características de dicho compresor son:



- ✓ Maquina con dos pistones con desplazamiento vertical
- ✓ Potencia = 250 Hp
- ✓ Peso del compresor = 12 Ton.
- ✓ Peso del electromotor 4 Ton.
- ✓ Velocidad de operación = 480 rpm.
- ✓ Los pistones están alineados con el plano longitudinal de simetría del bloque de cimentación. En la figura () se especifican las acciones dinámicas de la maquinaria y su localización respecto al centro de gravedad del sistema (CG).
- ✓ Las fuerzas verticales se encuentran desfasadas  $90^\circ$  y tienen los valores:

$$F_{1z} = 3 \cos pt, F_{2z} = -3 \sin pt.$$

Se desprecian los efectos dinámicos producidos por las bielas.

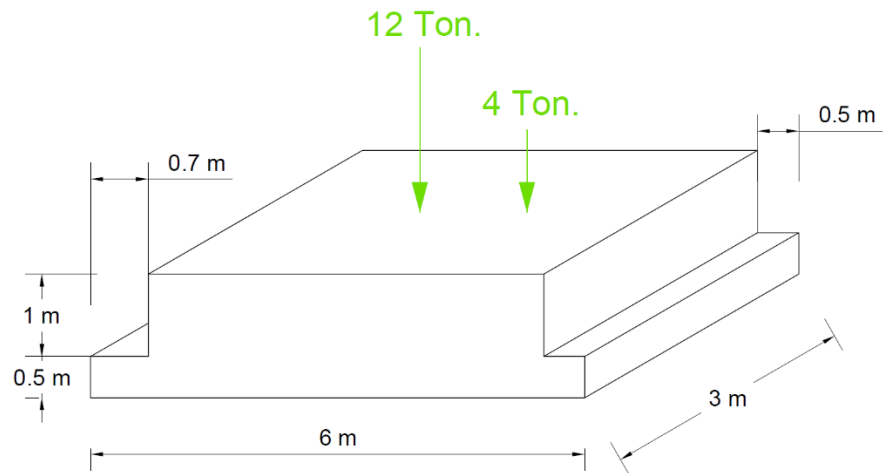
- ✓ El suelo sobre el que se encuentra sustentada la cimentación es una arcilla limosa, densa, con un contenido bajo de arena. Con los siguientes parámetros:

$$E = 1600 \text{ Kg/cm}^2$$

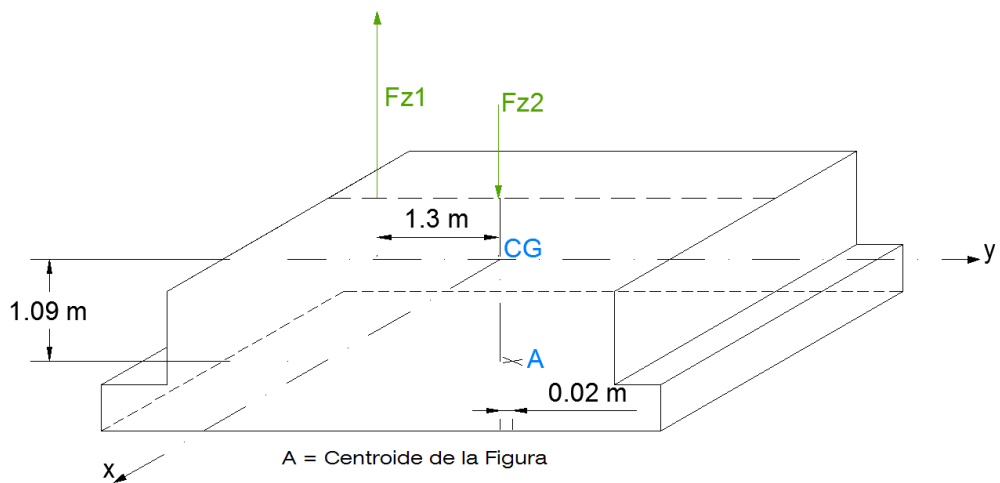
$$\nu = 0.4$$

$$\text{Peso volumétrico}, \gamma = 1.9 \text{ T/m}^3$$

La amplitud de desplazamiento vertical, máximo, permisible, es de 0.15 mm.



**IMAGEN 0.29- Ejemplo de Aplicación. (Luca Limaico)**



**IMAGEN 0.30 - Ejemplo de Aplicación - Análisis Geométrico (Luca Limaico)**

#### Características de la Maquinaria

Características:	2 Pistones con desplazamiento vertical.	
Potencia:	250	Hp
Peso Compresor:	12	Ton.
Peso Electromotor:	4	Ton.
Velocidad de Operación:	480	rpm
Amplitud de desplazamiento máximo:	0.15	mm

#### Características del suelo.

Elasticidad ( E ):	1600	$Kg/cm^2$
$\nu$ :	0.4	
Peso Volumétrico ( $\gamma$ ):	1.9	$T/m^3$

1. CÁLCULO DE MASAS	
Masa del compresor =	1.22 $Ton\,seg^2/m$
Masa del electromotor =	0.41 $Ton\,seg^2/m$
Masa de la cimentación =	5.27 $Ton\,seg^2/m$
Masa TOTAL =	6.9 $Ton\,seg^2/m$

2. CONSTANTES DE CALCULO	
G (Modulo de Corte) =	5714.29 $T/m^2$
$\rho$ (Densidad) =	0.194 $Ton\,seg^2/m^4$
$C_s$ (Velocidad de Ondas Transversales) =	171.62 $m/seg$
W (Frecuencia Circular) =	50 $seg^{-1}$
k =	0.291 $m^{-1}$
$r_o$ (Radio Equivalente) =	2.39 $m$
$a_o$ (Factor de Frecuencia) =	0.7

Constantes para desplazamiento Vertical (Imagen. 4.22)			
$f_1 =$	-0.11	$f_2 =$	0.07
$K_v =$	88369.81	$T/m$	
$Q_v =$	1124.71	$Ton\ seg/m$	
Constantes para desplazamiento Horizontal (Imagen. 4.23)			
$f_1 =$	-0.17	$f_2 =$	0.07
$K_h =$	68689.82	$T/m$	
$Q_h =$	565.68	$Ton\ seg/m$	
Constantes para rotación (Imagen. 4.24 y 4.25)			
$f_1 =$	-0.42	$f_2 =$	0.04
$S_h =$	184070.96	$T/m$	
$H_h =$	350.61	$Ton\ m\ seg$	

3. AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO VERTICAL	
P =	4.2 $Ton$
A =	0.046 $mm$
Se cumple que $A = 0.046\,mm < 0.15\,mm$	
$W_o$ (Frecuencia inicial)	113.17 $seg^{-1}$
=	
$W_o > W$ , la frecuencia del movimiento vertical no se encuentra en resonancia.	
4. MOMENTO DE INERCIA Y MOMENTO DE ROTACIÓN RESPECTO AL EJE X	

Se calcula los momentos de inercia de cada elemento en función del eje x que pasa por el centroide A, posteriormente se traslada esta inercia al eje x que pasa por el centro de gravedad del sistema (CG).

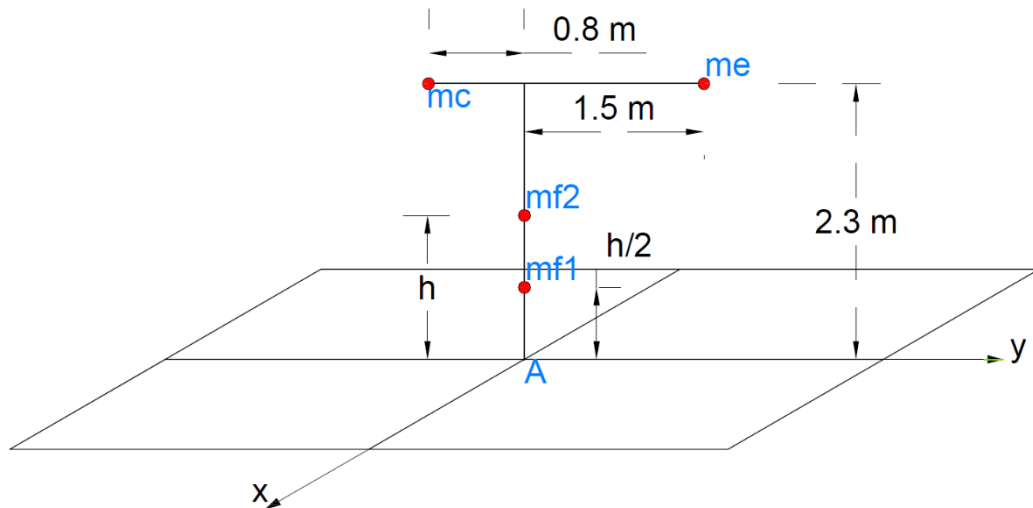


IMAGEN 0.31 - Ejemplo de Aplicación - Inercias. (Luca Limaico)

Inercia respecto al eje x que pasa por A.	
Compresor	7.3 Ton m seg <sup>2</sup>
Electromotor	3.1 Ton m seg <sup>2</sup>
Losa de Cimentación	6.1 Ton m seg <sup>2</sup>
Bloque de Cimentación	9.8 Ton m seg <sup>2</sup>
Inercia Total ( $I_{\bar{x}}$ )	26.3 Ton m seg <sup>2</sup>

Inercia respecto al eje x que pasa por G	
$I_{\bar{x}} =$	$I_x = I_{\bar{x}} - m * d^2$
$I_x =$	18.1 Ton m seg <sup>2</sup>

Momento de rotación respecto al eje x.

$$F_{z1} = 3 * \cos(pt)$$

$$F_{z2} = 3 * \sin(pt)$$

$$M_x = 1.5 * F_{z1} + 0.2 * F_{z2}$$

$$M_x = 1.5 * 3 * \cos(pt) + 0.2 * \sin(pt)$$

$$M_x = 4.6 * \cos(pt + \pi/4)$$

5. ROTACIÓN ALREDEDOR DE x Y  
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL SEGÚN y.

Como el centro de masas G del sistema se localiza a 1.09 m sobre el nivel de la cimentación, se debe considerar además de la rotación respecto al eje x el desplazamiento  $v$  existente.

De la ecuación 4.38:

$$I_x \ddot{\theta}_x = T_x + M_x + z_A R_y - y_A R_z$$

Se elimina el término  $y_A R_z$  por lo dicho anteriormente, resultando:

$$I_x \ddot{\theta}_x = T_x + M_x + z_A R_y$$

En la que se puede remplazar la ecuación 4.44, resultando:

$$I_x \ddot{\theta}_x = M_x - H_h \dot{\theta}_x - S_h \theta_x + z_A R_y$$

Si se remplaza los valores de  $Q_h, K_h, H_h, S_h$  y  $M_x$  calculados previamente, se obtiene:

Las ecuaciones A y B pueden escribirse de la forma:

$$z_A = 1.09 \text{ m}$$

$$\text{A) } 6.9 \ddot{V} = -565.68 (\dot{V} + 1.09 \dot{\theta}_x) - 68689.82 (V + 1.09 \theta_x)$$

$$\text{B) } 18.1 \ddot{\theta}_x = \frac{4.6 \cos(pt + \pi/4)}{+ \pi/4) - 350.61 \dot{\theta}_x - 184070.96 \theta_x - 1.09 (\dot{V} + 1.09 \dot{\theta}_x) - 68690 (V + 1.1 \theta)}$$

$$\text{A) } -616.59 \dot{\theta}_x + 74871.9 \theta_x + 6.9 \ddot{V} + 565.68 \dot{V} + 68689.82 V = 0$$

$$\text{B) } 18.1 \ddot{\theta}_x + 1022.69 \dot{\theta}_x + 265681.34 \theta_x + 616.59 \dot{V} + 74871.9 V = 4.6 \cos(pt + \pi/4)$$

## 6. AMPLITUDES DE ROTACIÓN Y DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL.

Para el cálculo de las amplitudes y desplazamientos se determinan las respuestas estacionarias del sistema producto de una excitación  $Ae^{ipt}$ , correspondiente a una impedancia mecánica donde A es la amplitud de la fuerza.

Datos del Fabricante:  $M = 4.6e^{i(pt+\pi/4)}$

Soluciones del sistema:

$$v = \bar{V}e^{i(pt+\pi/4)}$$

$$\Phi = \bar{\Phi}e^{i(pt+\pi/4)}$$

$$(68689.82 - 6.9 p^2 + i 565.68 p) \bar{V} + (74871.9 + i 616.59 p) \bar{\Phi} = 0$$

$$(74871.9 + i 616.59 p) \bar{V} + (265681.34 - 18.1 p^2 + i 1022.69 p) \bar{\Phi} = 4.6$$

$$\bar{V} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 74871.9 + i 616.59 p \\ 4.6 & 265681.34 - 18.1 p^2 + i 1022.69 p \end{vmatrix}}{f(p)}$$

$$\bar{\Phi} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 68689.82 - 6.9 p^2 + i 1022.69 p \\ 4.6 & 74871.9 + i 616.59 p \end{vmatrix}}{f(p)}$$

$$V = \sqrt{\frac{4.6^2(74871.9^2 + 616.59^2 p^2)}{F(p)}}$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{4.6^2(68689.82 - 6.9p^2)^2 + (565.68p)^2}{F(p)}}$$

$p =$	50	$seg^{-1}$
-------	----	------------

$F(p) =$	2.09182E+20
----------	-------------

Desplazamiento Horizontal	$V =$	0.03	mm
Rotación	$\Phi =$	0.016 E-3	

#### 4.9 Fuerza producida por un equipo recíproco.

Dentro del normal funcionamiento de un equipo recíproco el desbalance de uno de sus rotores produce una fuerza normal en dirección al eje de rotación de tipo recíproca que se expresa como:

$$F(t) = m_e W \sin(Wt) \quad \text{Ec 0.61}$$

En la que:

$m$  = Porción desbalanceada del rotor.

$e$  = Excentricidad.

$w$  = Velocidad angular de operacion del equipo.

$t$  = Tiempo.



#### 4.10 Puntos a considerar en la proyección de una cimentación tipo bloque de un equipo recíproco.

Es importante realizar una planificación adecuada al momento de diseñar una cimentación sujeta a esfuerzos dinámicos, por lo que es recomendable desarrollar un adecuado diseño preliminar para disipar y solventar todas las dudas, y posteriormente llevar a cabo un diseño definitivo adecuado y preciso.

##### 4.10.1 *Diseño Preliminar*

Dentro del diseño preliminar se recomienda especificar:

###### 4.10.1.1 *Vibración Vertical.*

- Cálculo del peso de la cimentación y el equipo a sustentar.
- Cálculo de la rigidez del resorte vertical  $k_z$  (Tabla 4.4).
- Determinación de la frecuencia natural vertical.
- Verificación de la frecuencia admisible (Tabla 4.13).

###### 4.10.1.2 *Vibración Horizontal.*

- Cálculo de rigidez horizontal  $k_x$  (Tabla 4.4).
- Cálculo de la frecuencia natural horizontal.
- Control de las frecuencias admisibles (Tabla 4.13).

###### 4.10.1.3 *Vibración de cabeceo.*

- Determinación de la rigidez de cabeceo  $k_\psi$  (Tabla 4.4).
- Localización del centro de gravedad (CG).
- Momento de inercia de la masa del bloque de cimentación con respecto al eje paralelo al eje de rotación y que pasa por su CG.

- Cálculo del momento total de inercia de la masa del sistema máquina-cimentación respecto al eje de desbalanceo.
- Determinación de la frecuencia natural de balanceo.

#### 4.10.2 Diseño Definitivo.

##### 4.10.2.1 Vibración Vertical.

- Relación de amortiguamiento  $D_z$  (Tabla 4.6).
- Cálculo de la amplitud de vibración.

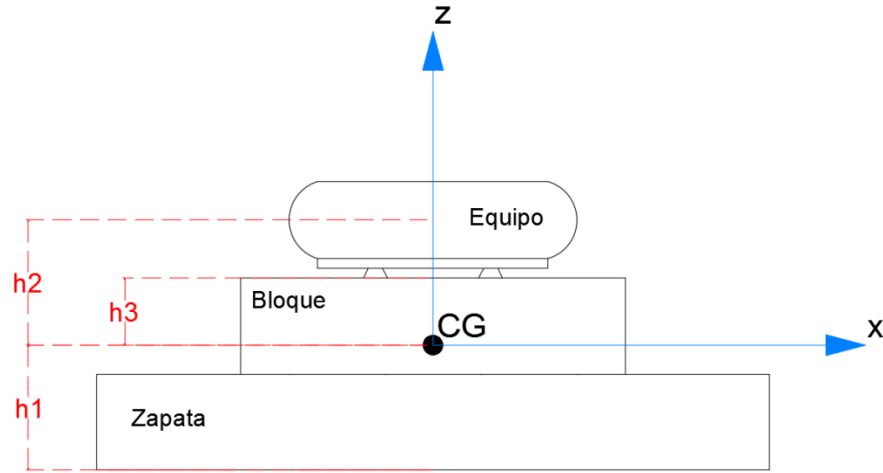
$$A_z = \frac{P_{zo}}{k_z} \sqrt{\left(1 - \frac{f_o^2}{f_n^2}\right)^2 + \left(2D_y \frac{f_o}{f_n}\right)^2} \quad \text{Ec. 0.62}$$

- Verificación de la amplitud permisible

##### 4.10.2.2 Vibración conjunta de cabeceo y vibración horizontal.

En la práctica, los efectos del cabeceo y de la vibración horizontal se producen de manera simultánea, por lo que es necesario realizar el análisis de manera conjunta por la importancia de los efectos de las amplitudes.

- Cálculo de la masa del equipo y la cimentación
- Cálculo de las constantes de amortiguamiento.
- Momento de inercia respecto al eje de cabeceo y desplazamiento.
- Determinación de la excitación dinámica
- Cálculo de las alturas  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  (Imagen 4.32).



**IMAGEN 0.32 - Esquema de Vibración Acoplada (Cabeceo y Rotación). (Luca Limaico)**

➤ Resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$(mw_o^2 - K_x)x_1 + C_x w_o x_2 + h_1 K_x a_1 - h_1 C_x w_o a_2 = -P_x \quad \text{Ec 0.63}$$

$$C_x w_o x_1 - (mw_o^2 - K_x)x_2 - h_1 C_x w_o a_1 + h_1 K_x a_2 = 0 \quad \text{Ec 0.64}$$

$$\begin{aligned} h_1 K_x x_1 - h_1 C_x w_o x_2 + (I_o w_o^2 - K_\psi - h_1^2 K_x) a_1 + (h_1^2 C_x w_o + C_\psi w_o) a_2 \\ = -P_x h_2 \end{aligned} \quad \text{Ec 0.65}$$

$$\begin{aligned} h_1 C_x w_o x_1 - h_1 K_x x_2 + (h_1^2 C_x w_o + C_\psi w_o) a_1 + (I_o w_o^2 - K_\psi - h_1^2 K_x) a_2 \\ = -P_x h_2 \end{aligned} \quad \text{Ec 0.66}$$

Para encontrar la solución del sistema se debe remplazar los coeficientes y determinar los valores de  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $a_1$  y  $a_2$ , utilizando conceptos de análisis matricial.

Amplitud horizontal:

$$A_h = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad \text{Ec 0.67}$$

Angulo de fase horizontal:

$$\tan \theta_x = \frac{x_1}{x_2} \quad \text{Ec 0.68}$$

Amplitud de cabeceo:

$$A_c = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad \text{Ec 0.69}$$

Angulo de fase de cabeceo:

$$\tan \theta_\psi = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{Ec 0.70}$$

Amplitud total de movimiento conjunto:

$$A_x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + h_3 \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad \text{Ec 0.71}$$

#### **4.11 Diseño de la cimentación de un TURBOGENERADOR GE LM-6000.**

A continuación se plantea el diseño completo de la cimentación de un turbogenerador General Electric, modelo LM-600. Incluyendo el análisis y diseño estructural, ingeniería de detalle y control de materiales.

Las dimensiones de la cimentación están dadas por el fabricante y especificadas en el esquema mostrado en la imagen 4.34.

Se considera plantear una losa de cimentación de hormigón armado que soporte desbalances, asentamientos diferenciales o desplazamientos excesivos.

#### **4.11.1 Materiales**

Para la losa de hormigón armado el fabricante estipula la utilización de hormigón con una resistencia  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$  y acero grado 60 con un  $fy = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ .

#### **4.11.2 Códigos y reglamentos a utilizarse.**

- Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011 (NEC 2011)
- ACI 351.3R-04 “Foundations for Dynamic Equipment” (Cimentaciones para Equipo Dinámico)
- ASCE-7 98.
- REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL.

#### **4.11.3 Cargas**

Las cargas estáticas, dinámicas, de viento y de sismo son determinadas por el fabricante del equipo General Electric en términos de magnitud, dirección y sentido.

El peso propio del sistema maquinaria-cimentación es obtenido gracias al análisis y diseño final.

##### **4.11.3.1 Cargas Muertas.**

Se considera como cargas muertas a todas aquellas producidas por la acción de la gravedad que actúan con la misma magnitud a lo largo de la vida útil de la cimentación.

En este caso en particular las cargas muertas son:

- Peso propio de los equipos
- Peso propio de la cimentación.

#### *4.11.3.2 Cargas Vivas.*

Para el análisis y al tratarse de una estructura de consideraciones especiales, se consideran las cargas de operación aplicadas durante el funcionamiento de la máquina, mediante las funciones propias del programa SAP 2000 (Steady State, Time History) como las sobre cargas actuantes.

#### *4.11.3.3 Cargas de Operación de los equipos.*

Se consideran todas las cargas producto de la operación del turbogenerador, compresor y generador. Cabe señalar que en las combinaciones de carga propuestas el factor aglomera toda la carga muerta.

Para el caso de las cargas de operación, la carga D se combina al 100 % de forma simultánea. Al considerar cargas de sismo o viento, la carga D se combina de forma simultánea y completa.

#### *4.11.3.4 Cargas de Sismo.*

Las cargas de sismo para la estructura se determinan mediante la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC), capítulo 2, peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente.

Se Determina el cortante basal mediante la expresión:

$$V_{NEC} = \frac{IS_a}{R\phi_E\phi_P} W \quad \text{Ec 0.61}$$

Donde,

$I = \text{Factor de importancia.}$

$S_a = \text{Aceleración espectral correspondiente al espectro de respuesta elástico para diseño.}$

$R = \text{Factor de reducción de respuesta estructural.}$

$\phi_E, \phi_P = \text{Factores de configuración estructural en planta y en elevación.}$

➤ Factor de Importancia:

**TABLA 0.14 - Factor de Importancia de una estructura.**

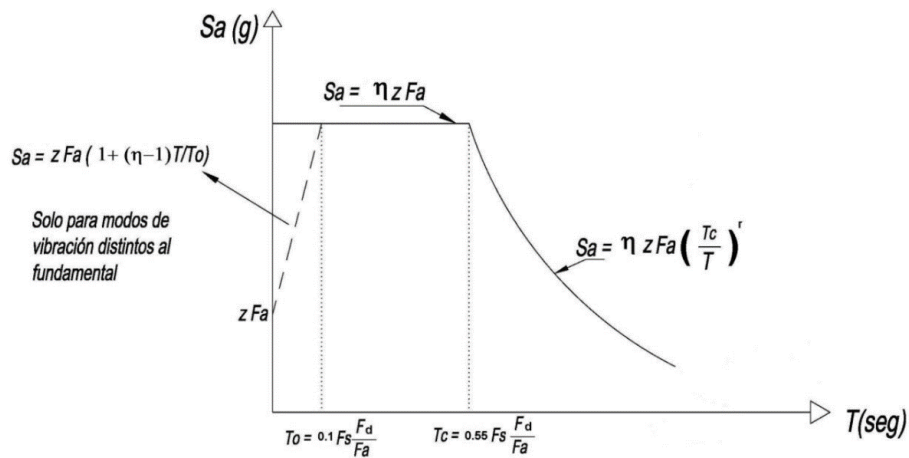
Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Factor
Edificaciones esenciales y/o peligrosas	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Fuente: (NEC, 2013)

I=	1
----	---

➤ Determinación del factor  $S_a$ :

Para la determinación de  $S_a$  se utiliza las fórmulas especificadas en la imagen 4.32.



**IMAGEN 0.33 – Factor  $S_a$ .**

Fuente: (NEC, 2013)

**TABLA 0.15 - Clasificación del tipo de Suelo**

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50.0$ $\bar{S}_u \geq 100 \text{ KPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{S}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$\bar{V}_s < 180 \text{ m/s}$
	perfil que contiene un espesor total $H$ mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $\bar{S}_u < 50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2)$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista (Ver 2.5.4.9). Se contemplan las siguientes subclases: <b>F1</b> —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. <b>F2</b> —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( $H > 3\text{m}$ para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). <b>F3</b> —Arcillas de muy alta plasticidad ( $H > 7.5 \text{ m}$ con índice de Plasticidad $IP > 75$ ) <b>F4</b> —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( $H > 30\text{m}$ ) <b>F5</b> —Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte. <b>F6</b> —Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Fuente: (NEC, 2013)



**TABLA 0.16 - Coeficientes de r. (NEC, 2013)**

Coeficiente r	
TIPO DE SUELO	r
A, B O C.	1
D, E	1.5

**TABLA 0.17 - Factores de Zona Sísmica**

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	$\geq 0.5$
Amenaza Sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: (NEC, 2013).

**TABLA 0.18 - Coeficientes de  $\eta$**

Coeficiente $\eta$	
PROVINCIAS	$\eta$
Costa, excepto Esmeraldas	1.8
Sierra, Esmeraldas y Galápagos	2.48
Oriente	2.6

Valores	
Tipo de Suelo	E
r =	1.5
Z =	0.3
$\eta$ =	2.6

Fuente: (NEC, 2013).

**TABLA 0.19 - Tipo de suelo y factores de sitio  $F_a$ .**

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1	1	1	1	1	1
C		1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D		1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E		1.8	1.5	1.39	1.26	1.14	0.97
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Fuente: (NEC, 2013)

Fa=	1.4
-----	-----

**TABLA 0.20 - Tipo de suelo y factores de sitio  $F_d$**

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	I	II	III	IV	V	VI
		0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1	1	1	1	1	1
C		1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
D		1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
E		2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Fuente: (NEC, 2013).

$F_d =$	1.7
---------	-----

**TABLA 0.21 - Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$ .**

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	I	II	III	IV	V	VI
		0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C		1	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45
D		1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65
E		1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Nota: Para los suelos tipo F no se proporcionan valores de  $F_a$ ,  $F_d$  ni de  $F_s$ , debido a que requieren un estudio especial, conforme lo estipula la sección 2.5.4.9.

Fuente: (NEC, 2013)

$F_s =$	1.7
---------	-----

$T_o =$	0.20643
---------	---------

$T_c =$	1.13536
---------	---------

$T =$	0.912
-------	-------

$S_a =$	1.51614
---------	---------

Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural R, Sistemas Estructurales Dúctiles	
Sistemas Duales	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras, sean de hormigón o acero laminado en caliente.	7
Pórticos de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	7
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas).	7
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.	6
Pórticos resistentes a momentos	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	6
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	6
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	6
Otros sistemas estructurales para edificaciones	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

**TABLA 0.22 - Coeficiente de reducción de respuesta estructural R (NEC, 2013)**

R=	5
----	---

IRREGULARIDAD EN PLANTA			
TIPO	DESCRIPCIÓN		
1	Torsión en planta		
2	Retrocesos excesivos en esquinas		
3	Discontinuidades en el sistema de piso		
4	Ejes estructurales no paralelos		
Colocar 0.9 si existe - 1.0 si no existe			
	TIPO		
	1,2,3	$\phi_{PA} =$	1
	4	$\phi_{PB} =$	1
	$\phi_P =$		1

IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN			
TIPO	DESCRIPCIÓN		
1	Piso débil		
2	Concentración de masas		
3	Irregularidad geométrica		
Colocar 0.9 si existe - 1.0 si no existe			
	TIPO		
	1	$\phi_{EA} =$	1
	2,3	$\phi_{EB} =$	0.9
	$\phi_E =$		0.9

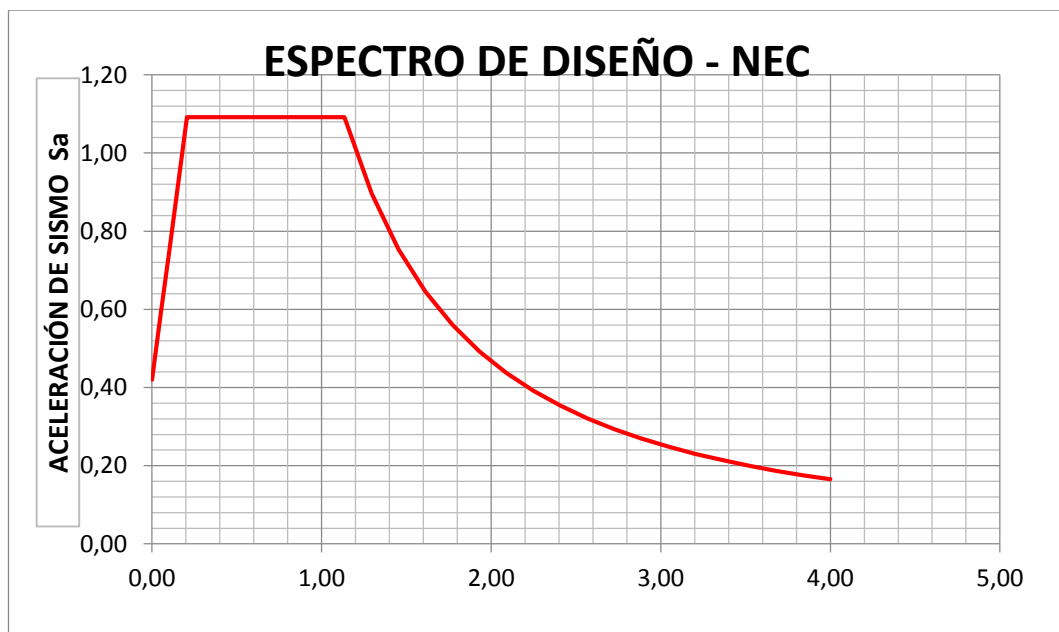
$$V_{NEC} = \frac{1 * 1.51614}{5 * 1 * 0.9} W$$

$$V_{NEC} = 0.3369 * W$$

La empresa General Electric provee un valor de coeficiente basal de  $V_{GE} = 0.474$  por lo que se propone un factor de conversión:

$$F = \frac{V_{NEC}}{V_{GE}}$$

$$F = 0.711.$$



*IMAGEN 0.34 - Espectro de Diseño NEC - Turbogenerador. (Luca Limaico)*

#### 4.11.4 Combinaciones de Cargas.

Las combinaciones de carga que se utilizarán serán obtenidas del código ACI 318S-08.

Se utilizan combinaciones de carga para asegurar que la resistencia de diseño sea al menos igual a la resistencia requerida, calculando esta última con cargas y fuerzas mayoradas. Los factores de mayoración consideran la probabilidad de ocurrencia simultánea de dichas cargas.

$$1. - U = 1.4D + 1.7L$$

$$2. - U = 1.2(D + F + T) + 1.6(L + H) + 0.5(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$$

$$3. - U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ o } S \text{ o } R) + (1.0L \text{ o } 0.8W)$$

$$4. - U = 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S$$

$$5. - U = 0.9D + 1.0E + 1.6H$$

En las combinaciones de carga propuestas se puede identificar:

$D = \text{Carga permanente}$

$E = \text{Carga de sismo}$

$F = \text{Carga de fluidos con presiones y alturas máximas bien definidas}$

$H$

$= \text{Carga por la presión lateral de suelo, presión de agua en el suelo, o presión de materiales a granel}$

$L = \text{Sobrecarga (carga viva)}$

$L_r = \text{Sobrecarga cubierta (carga viva)}$

$R = \text{Carga de lluvia}$

$S = \text{Carga de granizo}$

$W = \text{Carga de viento}$

Para el modelo se utilizaran las combinaciones de carga de la siguiente manera:

$D = \text{Dead} + \text{Cargas de Operación.}$

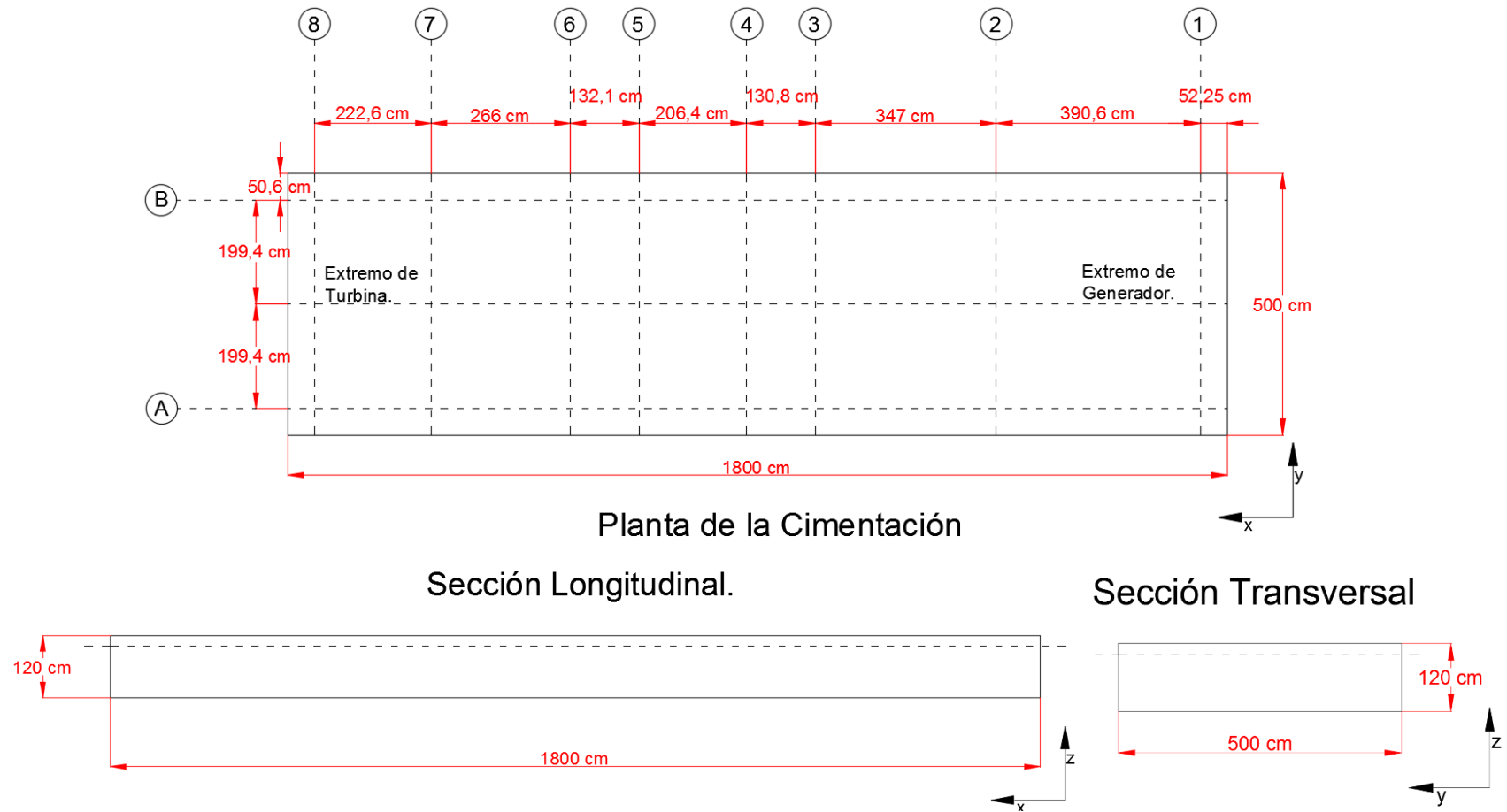
***TABLA 0.23-Combinaciones de Carga a Utilizarse-Turbogenerador (Luca Limaico)***

1	1.4 D + 1.7 Steady1-AP
2	1.4 D + 1.7 Steady2-BP
3	1.4 D + 1.7 TimeHis1-AP
4	1.4 D + 1.7 TimeHis2-BP
5	1.2 D + 1.6 Steady1-AP
6	1.2 D + 1.6 Steady2-BP
7	1.2 D + 1.6 TimeHis1-AP
8	1.2 D + 1.6 TimeHis2-BP
9	1.2 D + 1.0 Steady1-AP
10	1.2 D + 1.0 Steady2-BP
11	1.2 D + 1.0 TimeHis1-AP
12	1.2 D + 1.0 TimeHis2-BP
13	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 Steady1-AP
14	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 Steady2-BP
15	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 TimeHis1-AP
16	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 TimeHis2-BP
17	0.9 D + 1.0 SISMO

Para el análisis de los datos se utilizarán combinaciones con cargas únicamente de servicio, es decir, cargas que reflejen la masa del sistema cimentación-equipos sin coeficientes de mayoración.



**4.11.5 Geometría de la cimentación.**

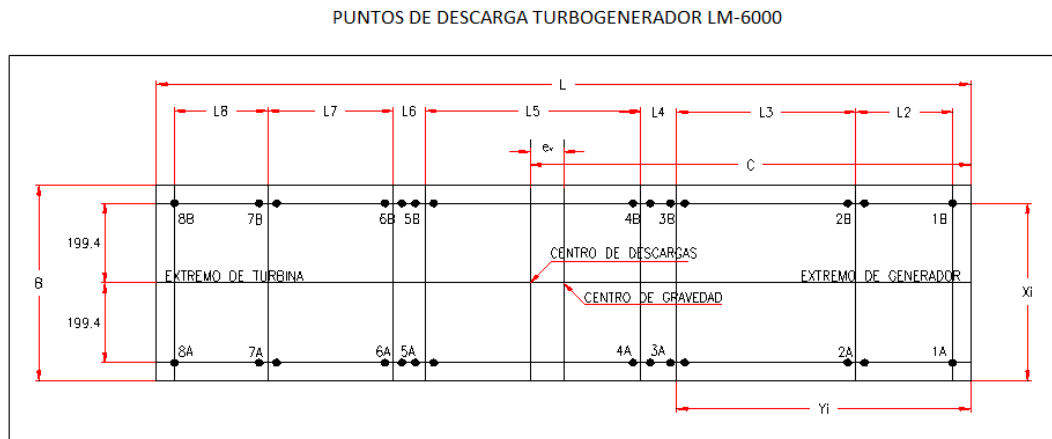


**IMAGEN 0.35 - Geometría de la Cimentación. (Luca Limaico)**



#### 4.11.6 Análisis Pseudo-Dinámico de la cimentación.

El análisis pseudo estático se realiza a partir de la consideración de los puntos de descarga de la cimentación proporcionados por General Electric. Siguiendo los procedimientos propuestos por la American Concrete Institute (ACI) en la norma ACI 351.3R-04 y el manual de cimientos de máquinas publicado por Structural Engineering Research Centre (Centro de Investigación en Ingeniería Estructural).



DATOS:

Maquinaria

Cimentación: L = 1800.00 cm  
 B = 500.00 cm  
 L1 = 52.25 cm  
 L2 = 390.60 cm  
 L3 = 347.00 cm  
 L4 = 130.80 cm  
 L5 = 206.40 cm  
 L6 = 132.10 cm  
 L7 = 266.00 cm  
 L8 = 222.60 cm

Frecuencia de operación

$f_o = 60$  ciclo/seg

Velocidad ( $W_o$ ) = 3600 rpm

$W_o > 1000$ , Equipo de Alta Velocidad

CARGAS						
	CARGA ESTÁTICA		CENTRO DE DESCARGAS			
PUNTO	Py					
	kips	ton	Yi	P Yi	Xi	P Xi
1-A	10.60	4.808	52.250	2.512	50.600	2.433
1-B	11.60	5.262	52.250	2.749	449.400	23.647
2-A	69.00	31.298	442.850	138.603	50.600	15.837
2-B	68.70	31.162	442.850	138.001	449.400	140.042
3-A	67.40	30.572	789.850	241.473	50.600	15.469
3-B	67.80	30.754	789.850	242.910	449.400	138.208
4-A	30.80	13.971	920.650	128.624	50.600	7.069
4-B	32.90	14.923	920.650	137.389	449.400	67.064
5-A	34.60	15.694	1127.050	176.879	50.600	7.941
5-B	37.00	16.783	1127.050	189.153	449.400	75.423
6-A	30.00	13.608	1259.150	171.345	50.600	6.886
6-B	18.50	8.391	1259.150	105.655	449.400	37.709
7-A	23.90	10.841	1525.150	165.342	50.600	5.486
7-B	22.00	9.979	1525.150	152.195	449.400	44.846
8-A	15.20	6.895	1747.750	120.507	50.600	3.489
9-B	17.30	7.847	1747.750	137.146	449.400	35.264
TOTAL	557.3	252.788		2250.483		626.813

Centro de la LOSA       $X_g = 2.50$  m     $Y_g = 9.00$  m  
Centro de DESCARGA     $X_d = 2.48$  m     $Y_d = 8.903$  m

#### CHEQUEO DE EXCENTRICIDAD

Límite de excentricidad      de       $e \leq 5\%$  respecto a las dimensiones en el eje de calculo

$e_x = X_g - X_d = 0.02$  m = 0.41 %    OK  
 $e_y = Y_g - Y_d = 0.097$  m = 0.54 %    OK

#### PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL SUELO

De la ecuación:

$$r_o = \sqrt{\frac{At}{\pi}}$$

Bloque de cimentación =  $2a \times 2b$

a =	900	cm
b =	250	cm

Traslación

$$r_o = \sqrt{\frac{4 * a * b}{\pi}} = 535.24 \text{ cm}$$

### Cabeceo

$$r_o = \sqrt[4]{\frac{16 * a * b^3}{3\pi}} = 393.08 \quad \begin{matrix} \text{c} \\ \text{m} \end{matrix}$$

### Torsión

$$r_o = \sqrt[4]{\frac{16ab(a^2 + b^2)}{6\pi}} = 638.91 \quad \begin{matrix} \text{c} \\ \text{m} \end{matrix}$$

Módulo de Cortante	G =	428.6	$Kg/cm^2$
Módulo de Poisson	$\nu$ =	0.4	
Peso Volumétrico	$\gamma$ =	0.0015	$Kg/cm^3$
Densidad	$\rho$ =	1.5E-06	$Kg \text{ seg}^2/cm^3$

## DETERMINACIÓN DE FRECUENCIAS

Frecuencias admisibles

$$0.6f_o \leq f \leq 1.4f_o$$

0.6* fo =	36	Hz
1.4 * fo =	84	Hz

Peso de la Cimentación = 259200 Kg

### Vibración Vertical

H cimt =	120.00	cm
P. cimt =	259200	Kg
P. equipo =	252788	Kg
Peso TOTAL	511988	Kg
L/B =	3.6	



SUELO

Rigidez del resorte Kz

h=Altura o profundidad de empotramiento.

h =	120 cm
$\beta_z$	1.2

$$\eta_z = 1 + 0.6(1 - \nu)(h/r_o) = 1.080711457$$

$$k_z = \frac{G}{1 - \nu} \beta_z \sqrt{BL} \eta_z = 878846.79 \text{ Kg/cm}$$

Frecuencia natural vertical fn

$$\text{Masa del sistema (P. Total/g)} = 521.9042 \text{ kg seg}^2/\text{cm}$$

$$\text{Gravedad (g)} = 9.81 \text{ m/seg}^2$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} =$$

$$6.531025 \text{ ciclos/seg}$$

OK

$$T_n = 0.153115 \text{ seg}$$

#### Vibración Horizontal

SUELO

Rigidez del resorte Kx

h=Altura o profundidad de empotramiento.

h =	120 cm
$\beta_x$	0.73

$$1.197294672$$

$$\eta_x = 1 + 0.55(2 - \nu)(h/r_o) =$$

$$995073.96 \text{ Kg/cm}$$

$$k_x = 2(1 + \nu)G\beta_x \sqrt{BL} \eta_x =$$

Frecuencia natural horizontal fn

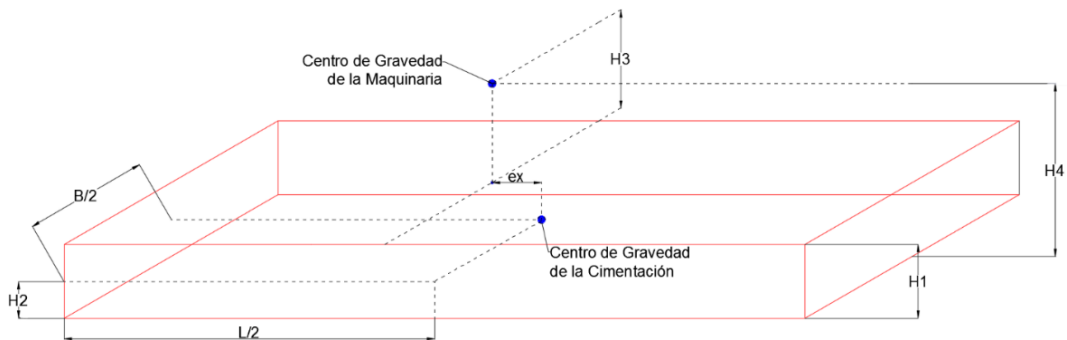
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}} =$$

$$6.949482 \text{ ciclos/seg}$$

OK

$$T_n = 0.143896 \text{ seg}$$

#### Vibración de Balanceo



H1 =	120	cm
H2 =	60	cm
H3 =	405.4	cm
H4 =	525.4	cm

Centro de Gravedad del Equipo

m. equipo (me) = 257.684  $kg\ seg^2/cm$

Momento de Inercia del equipo

71132421.01

$I_{e_{x,z}} = m_e * H_4^2 =$   $kg\ seg^2\ cm$

m. cimentación = 264.2202  $kg\ seg^2/cm$

Momento de Inercia de la cimentación

$I_{bz} = \frac{m_b}{12} (L^2 + H_{1b}^2) + m_b \left( \frac{H_{1b}}{2} \right)^2 =$  72607711  $kg\ seg^2\ cm$

$I_{bx} = \frac{m_b}{12} (B^2 + H_{1b}^2) + m_b \left( \frac{H_{1b}}{2} \right)^2 =$   $kg\ seg^2\ cm$

Momento de Inercia Total

$I_{Tx} = I_{e_{x,z}} + I_{bx} =$  77905265.47  $kg\ seg^2\ cm$

$I_{Tz} = I_{e_{x,z}} + I_{bz} =$  143740132  $kg\ seg^2\ cm$

DISEÑO DEFINITIVO, AMPLITUD DE MOVIMIENTOS.

### Vibración Vertical

Relación de amortiguamiento, D

$$B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} \frac{W}{\gamma r_o^3} = 0.3339$$

Factor de empotramiento en D

$$\alpha_z = \frac{1 + 1.90(1 - \nu) \frac{h}{r_o}}{0.425} = 1.207790706$$

$$D_z = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}} \alpha_z = 0.8883$$

Fuerzas desbalanceadas de las masas giratorias

Generador			Turbina		
Pg =	73499.5	Kg	Pt =	7987.76	Kg
Prg =	22049.9	Kg	Prt =	6789.6	Kg
(Vel. Oper.)=	3600	rpm	$\omega_o T =$	3600	rpm
m =	22.477	kg seg <sup>2</sup> /cm	m =	6.921	kg seg <sup>2</sup> /cm

Excentricidad de la masa desbalanceada

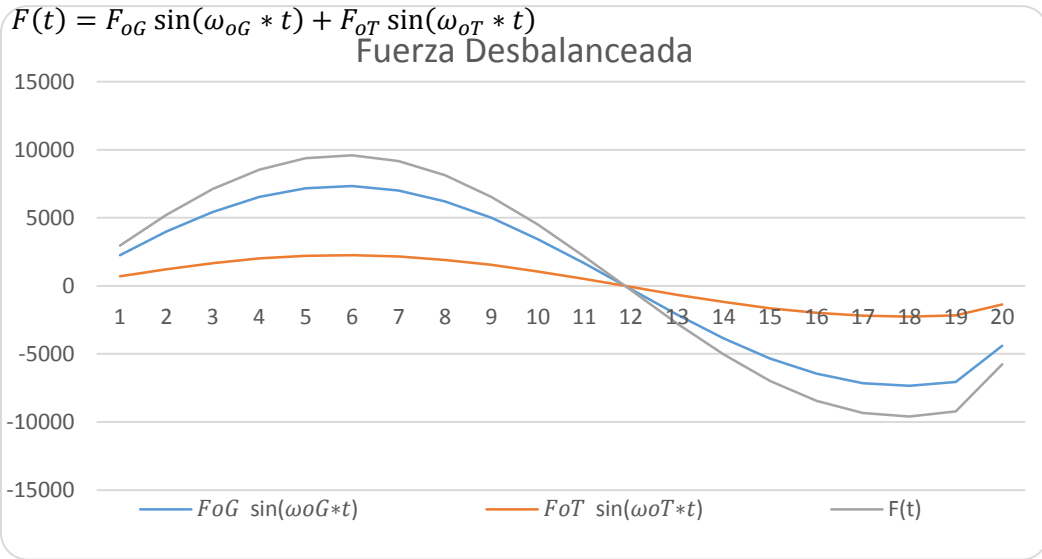
$\alpha = 0.5$  Al instalar el equipo

$\alpha = 1$  Después de varios años de instalado el equipo

Generador		
$e = \alpha \sqrt{\frac{12000}{\omega_{oG}}} (in) =$	0.000912871	in
	0.0023	Kg
Fuerza Centrípeta		
$F_{oG} = (P_{rG}/g) e (\omega_{oG}^2) =$	7347.299	Kg
Periodo		
$T = 2\pi/\omega_{oG} =$	0.01667	Seg

Turbina		
$e = \alpha \sqrt{\frac{12000}{\omega_{oT}}} (in) =$	0.000912871	In
	0.0023	Cm
Fuerza Centrifuga		
$F_{oT} = (P_{rT}/g) e (\omega_{oT}^2) =$	2262.378	Kg
Periodo		
$T = 2\pi/\omega_{oT} =$	0.01667	Seg

Fuerza desbalanceada



t (seg)	$F_{oG} \sin(\omega_{oG} * t)$	$F_{oT} \sin(\omega_{oT} * t)$	F(t)
0	0	0	0
0.00083	2261.657	696.409	2958.066
0.00152	3983.541	1226.611	5210.152
0.00221	5437.397	1674.281	7111.678
0.0029	6525.404	2009.3	8534.704
0.00359	7174.358	2209.126	9383.484
0.00428	7340.594	2260.313	9600.907
0.00497	7012.927	2159.418	9172.345
0.00566	6213.405	1913.23	8126.635
0.00635	4995.821	1538.312	6534.133
0.00704	3442.099	1059.89	4501.989
0.00773	1656.781	510.155	2166.936
0.00842	-240.012	-73.905	-313.917
0.00911	-2120.657	-652.992	-2773.649
0.0098	-3858.615	-1188.144	-5046.759
0.01049	-5336.951	-1643.352	-6980.303
0.01118	-6456.198	-1987.99	-8444.188
0.01187	-7141.047	-2198.869	-9339.916
0.01256	-7345.419	-2261.799	-9607.218
0.01325	-7055.565	-2172.547	-9228.112
0.01496	-4407.774	-1357.24	-5765.014
0.01667	9.233	2.843	12.076
$F(t)_{max} =$	9607.218	Kg	
t =	0.01256	seg	

### Amplitud de la Vibración Az

$$A_z = \frac{F(t)_{max}}{k_z} \left[ \left( 1 - \frac{f_o^2}{f_n^2} \right)^2 + \left( 2D_z - \frac{f_o}{f_n} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.0013 \text{ mm}$$

### Vibración acoplada

#### Relación de Inercia

$$B_x = \frac{(7-8\nu)}{32(1-\nu)} \frac{W}{\gamma r_o^3} = 0.441$$

$$B_{\psi(x)} = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_x}{\rho r_o^5} = 0.248$$

$$B_{\psi(y)} = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{I_z}{\rho r_o^5} = 0.023$$

Relación de Amortiguamiento	
h =	120 cm
$\eta_x = 1 + 0.55(2-\nu)(h/r_o) =$	1.197294672
$\alpha_x = \frac{1 + 1.90(2-\nu)\frac{h}{r_o}}{\sqrt{\eta_x}} =$	1.536783624
$\eta_\psi = 1 + 1.20(1-\nu)(h/r_o) + 0.20(2-\nu)(h/r_o)^3 =$	1.165029098
$\alpha_\psi = \frac{1 + 0.70(1-\nu)\frac{h}{r_o} + 0.60(2-\nu)(\frac{h}{r_o})^3}{\sqrt{\eta_\psi}} =$	1.023733197
$D_x = \frac{0.288}{\sqrt{B_x}} \alpha_x =$	0.666
$D_\psi = \frac{0.15\alpha_\psi}{(1+n_\psi B_{\psi(x)})\sqrt{n_\psi B_{\psi(x)}}} =$	0.222
$D_\psi = \frac{0.15\alpha_\psi}{(1+n_\psi B_{\psi(y)})\sqrt{n_\psi B_{\psi(y)}}} =$	0.914
Constantes de Amortiguamiento	
$C_{x,z} = 2 * D_x \sqrt{k_{xz}m} =$	30354.794
$C_{\psi,z} = 2 * D_{\psi(x)} \sqrt{k_{\psi(x)} I_x} =$	3774001.109
$C_{\psi,z} = 2 * D_{\psi(z)} \sqrt{k_{\psi(z)} I_z} =$	4745581.356



## Sistema de Ecuaciones

$$(mw_o^2 - K_x)x_1 + C_x w_o x_2 + h_1 K_x a_1 - h_1 C_x w_o a_2 = -F_d$$

$$C_x w_o x_1 - (mw_o^2 - K_x)x_2 - h_1 C_x w_o a_1 + h_1 K_x a_2 = 0$$

$$h_1 K_x x_1 - h_1 C_x w_o x_2 + (I_o w_o^2 - K_\psi - h_1^2 K_x)a_1 + (h_1^2 C_x w_o + C_\psi w_o)a_2 = -F_d h_2$$

$$h_1 C_x w_o x_1 - h_1 K_x x_2 + (h_1^2 C_x w_o + C_\psi w_o)a_1 + (I_x w_o^2 - K_\psi - h_1^2 K_x)a_2 = 0$$

Rigidez	$k_\psi$		
$\beta_\psi =$	0.49	h =	120 cm

$$\eta_\psi = 1 + 1.20(1 - \nu)(h/r_o) + 0.20(2 - \nu)(h/r_o)^3 = 1.22890698$$

$$k_\psi = \frac{G}{1 - \nu} \beta_\psi B L^2 \eta_\psi \quad 6.97E+11$$

## Resolución Matricial

$F_d =$	9607.218	Kg
$I_x =$	6772844.5	kg seg <sup>2</sup> cm
y =	289.786	cm
$H_5 =$	236	cm

x1 =	-2.56567E-05
x2 =	1.10858E-05
a1 =	5.43291E-07
a2 =	2.41641E-06

Ec. 1 =	0
Ec. 2 =	-1.933E-12
Ec. 4 =	0.00E+00
Ec. 5 =	0.00E+00
y =	3.74E-24

Amplitudes del Movimiento	
Amplitud Horizontal	

$$A_h = 0.000279492 \text{ mm}$$

Angulo de Fase Horizontal	$\tan \theta_x = x_1/x_2$
---------------------------	---------------------------

$$\theta_x = -1.16294359$$

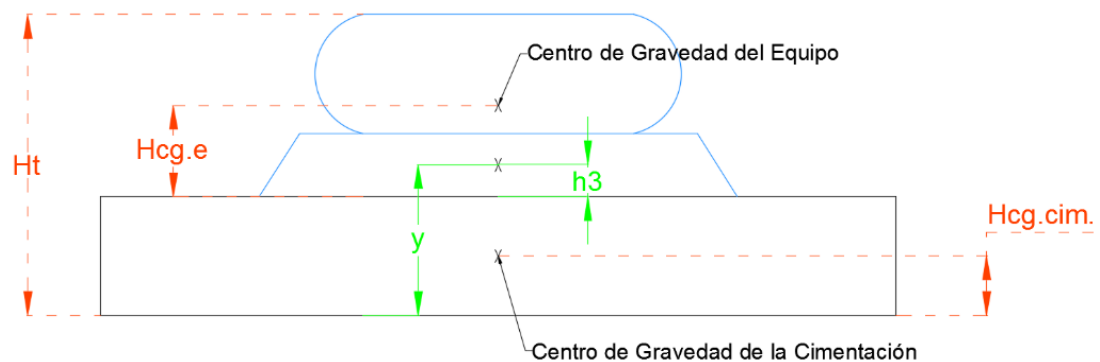
Amplitud de Cabeceo	$A_c = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$
---------------------	------------------------------

$$A_c = 2.47673\text{E-}05 \text{ mm}$$

Angulo de Fase de Cabeceo	$\tan \theta_\psi = a_1/a_2$
---------------------------	------------------------------

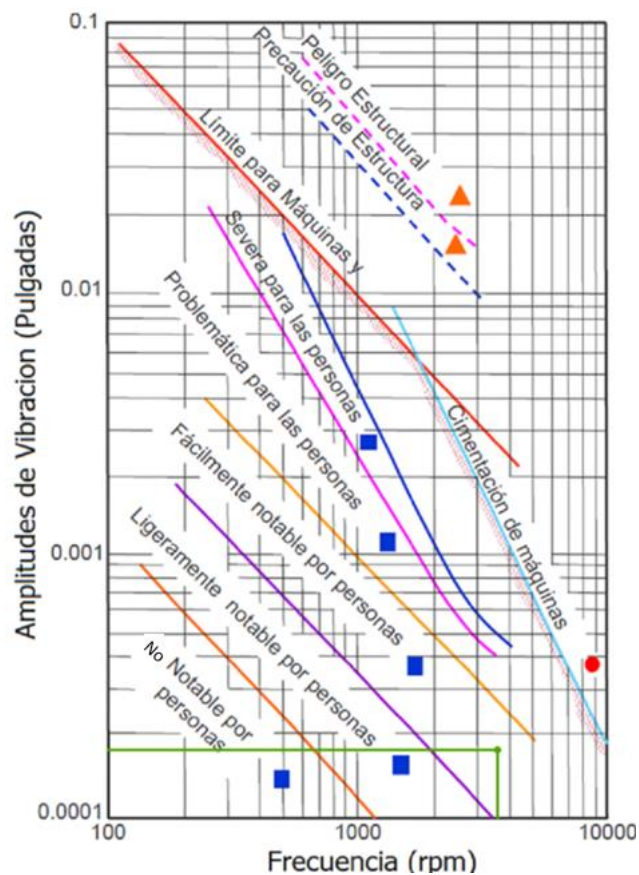
$$\theta_\psi = 0.221156297$$

Amplitud Horizontal Total (Acoplada)		
Hcg. Cim. =	60	cm
Hcg. Equi. =	405.4	cm
m. equipo (me) =	257.684	kg seg <sup>2</sup> /cm
m. cimentación =	264.2202	kg seg <sup>2</sup> /cm
y =	289.786	cm
h <sub>3</sub> =	169.786	cm



$$A_x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + h_3 \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

$A_x =$	0.0044846 mm
$A_x =$	0.0001766 in



Al analizar la amplitud del movimiento del sistema maquina-cimentacion, mediante el abaco ubicado en la imagen 1.12 del presente trabajo, podemos determinar que los efectos de la amplitud del movimiento se encuentran dentro del rango de facilmente notado por personas. Lo que garantiza las dimensiones recomendadas por el fabricante del equipo.

#### 4.11.7 Modelación de la cimentación mediante el programa SAP2000 v16.0

La cimentación del turbogenerador será modelada gracias al programa SAP 2000 que posee una interfaz capaz de soportar el ingreso de todas las características de la cimentación, el suelo y las excitaciones producidas por la máquina. El programa

genera la información de esfuerzos admisibles, asentamientos, cortantes y momentos flectores para el diseño del refuerzo.

#### 4.11.7.1 Tipo de Modelo.

Se utiliza el modelo tipo Grid Only (Solo grilla) de SAP2000 para modelar la cimentación.

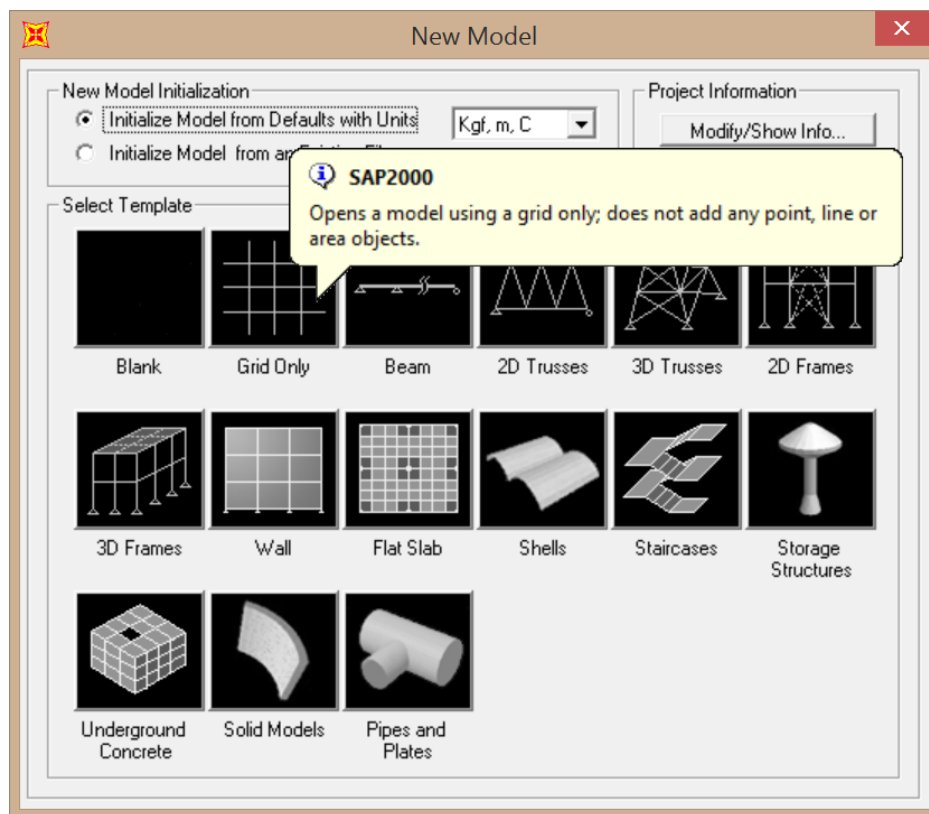
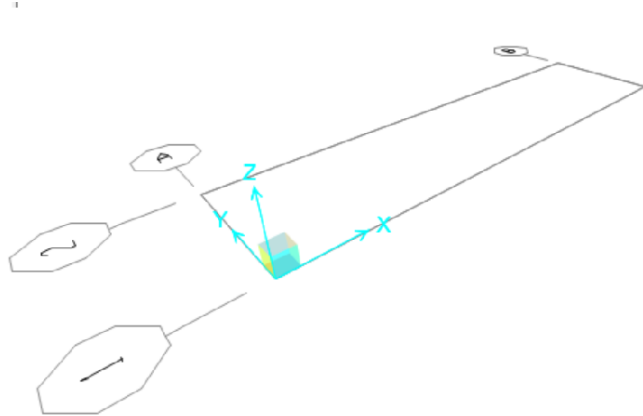
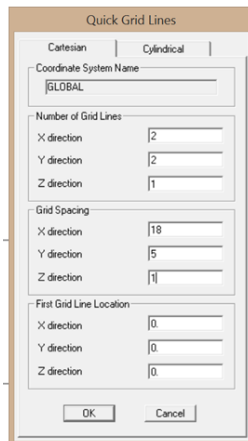


IMAGEN 0.36 - Tipo de modelo (SAP 2000)

#### 4.11.7.2 Geometría del modelo.

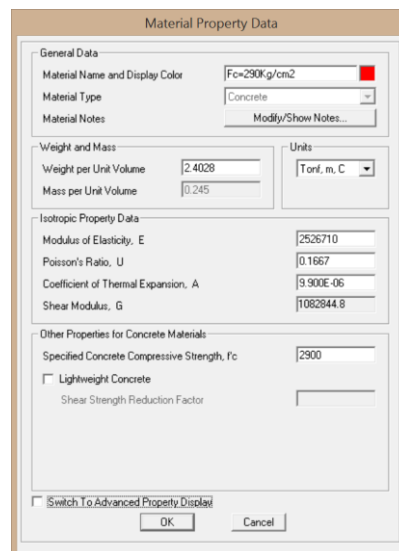
Posteriormente se delimita la geometría de la cimentación, contemplando los respectivos ejes, para que estos sean coincidentes con la realidad.



**IMAGEN 0.37 - Geometría del modelo. (SAP 2000)**

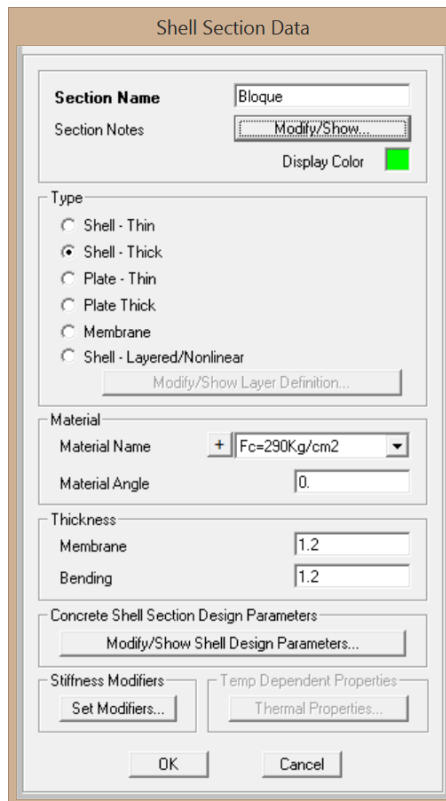
#### 4.11.7.3 Definición de los materiales y elementos.

Se define el material a utilizarse en la cimentación, que será un hormigón con una resistencia de  $280 \text{ Kg/cm}^2$ .



**IMAGEN 0.38 - Definición del material del modelo. (SAP 2000)**

Posteriormente se define el tipo de elemento con el que se modelará la estructura, se utilizará un elemento tipo Shell Thick (Placa Gruesa) puesto que representa con mayor exactitud las características propias de la cimentación. Se desprecia utilizar factores de reducción de agrietamiento puesto que se trata de un elemento masivo de hormigón.



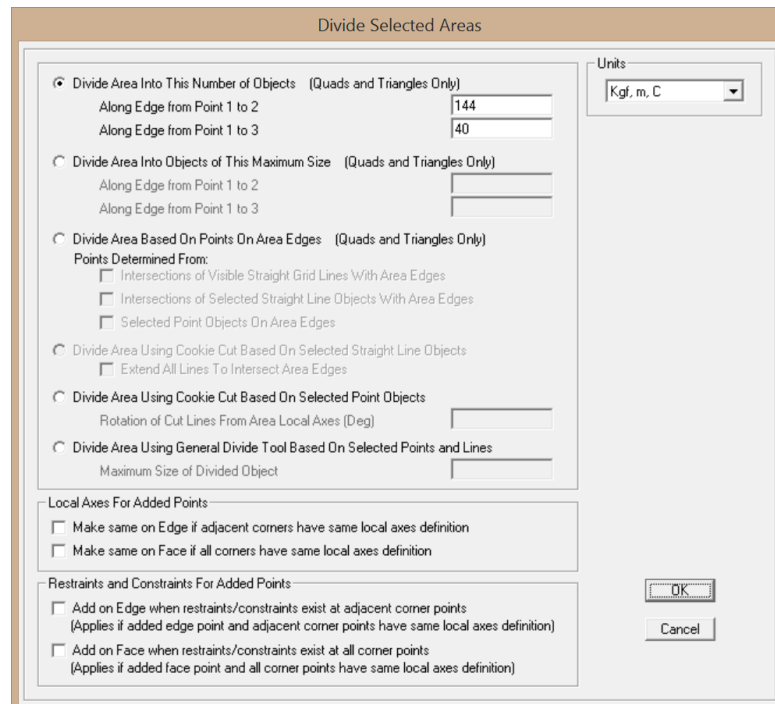
**IMAGEN 0.39 - Definición de la sección. (SAP 2000)**

#### 4.11.7.4 Discretización de la cimentación.

Al asignar el área Shell a la grilla inicial, se procede a dividir el área total en rectángulos de 12.5 cm x 12.5 cm para obtener varios elementos finitos y así poder asignar y ubicar las diferentes cargas, así como los elementos de resorte y analizar los resultados finales con mayor exactitud.

$$\frac{1800 \text{ cm}}{144} = 12.5 \text{ cm}$$

$$\frac{500 \text{ cm}}{40} = 12.5 \text{ cm}$$



**IMAGEN 0.40 - Discretización de la cimentación. (SAP 2000)**

#### 4.11.7.5 Definición de los esfuerzos admisibles del suelo.

Se determina el esfuerzo admisible a compresión del suelo mediante la aplicación de la fórmula propuesta por Bowless:

$$Kb = 40 * Fs * \sigma_{adm}$$

Donde,

$Fs$  = Factor de seguridad.

$\sigma_{adm}$  = Esfuerzo admisible del suelo.

Considerando un factor de seguridad de 3 y el esfuerzo admisible del suelo de  $18 \text{ t/m}^2$  se determina:

$$Kb = 40 * 3 * 18 \text{ t/m}^2$$

$$Kb = 2160 \text{ t/m}^3$$

$$Kb_{Area} = 2160 \text{ t/m}$$

En el modelo de SAP 2000 se ingresa este valor como un coeficiente de rigidez de resortes aplicados directamente sobre el área de la cimentación. Es importante mencionar que se debe utilizar únicamente resortes que soportan compresión por las cualidades mecánicas del suelo.

The image shows a software dialog box titled "Assign Springs To Area Object Face". It contains the following fields and options:

- Spring Type:**
  - ☒ Simple
    - Spring Stiffness per Unit Area: 2160
    - Simple Spring Resists: Compression Only
  - ☐ Link Property
- Spring Location:**
  - Area Object Face: Bottom
- Spring Tension Direction:**
  - ☐ Parallel to Area Object Local Axis
  - ☒ Normal To Specified Area Object Face
    - Inward
  - ☐ User Specified Direction Vector
    - Coordinate System
    - Global X Component
    - Global Y Component
    - Global Z Component
- Positive Local 2-Axis Orientation:**
  - Link Local 2-Axis Angle From Default Orientation: 0
- Options:**
  - ☐ Add to Existing Springs
  - ☒ Replace Existing Springs
  - ☐ Delete Existing Springs

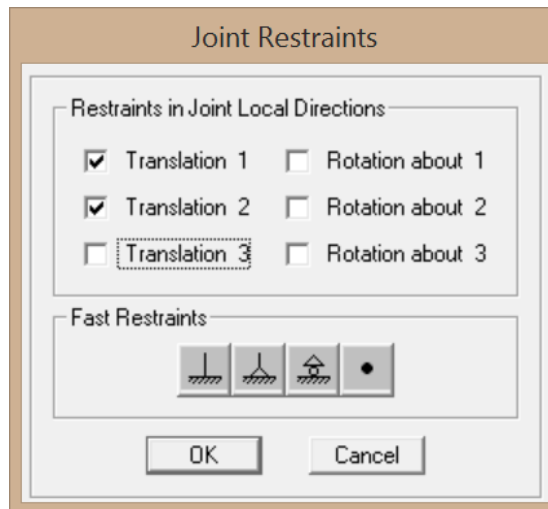
Buttons: OK, Cancel

**IMAGEN 0.41 - Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. (SAP 2000)**

#### 4.11.7.6 Restricciones del modelo.

Se asignan restricciones de movimiento en los sentidos X y Y por el desplante de la cimentación:

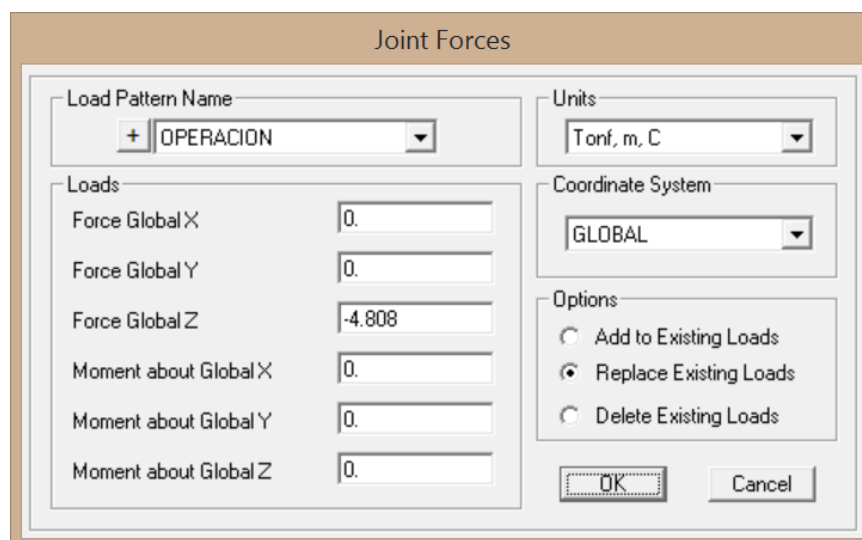




**IMAGEN 0.42 - Restricciones del modelo. (SAP 2000)**

#### 4.11.7.7 Asignación de cargas

Según las cargas especificadas por el fabricante se asignan las cargas estáticas específicas en cada punto, considerando un tipo de cargas de OPERACIÓN para cada una de las cargas.



**IMAGEN 0.43 - Asignación de cargas en el modelo(SAP 2000)**

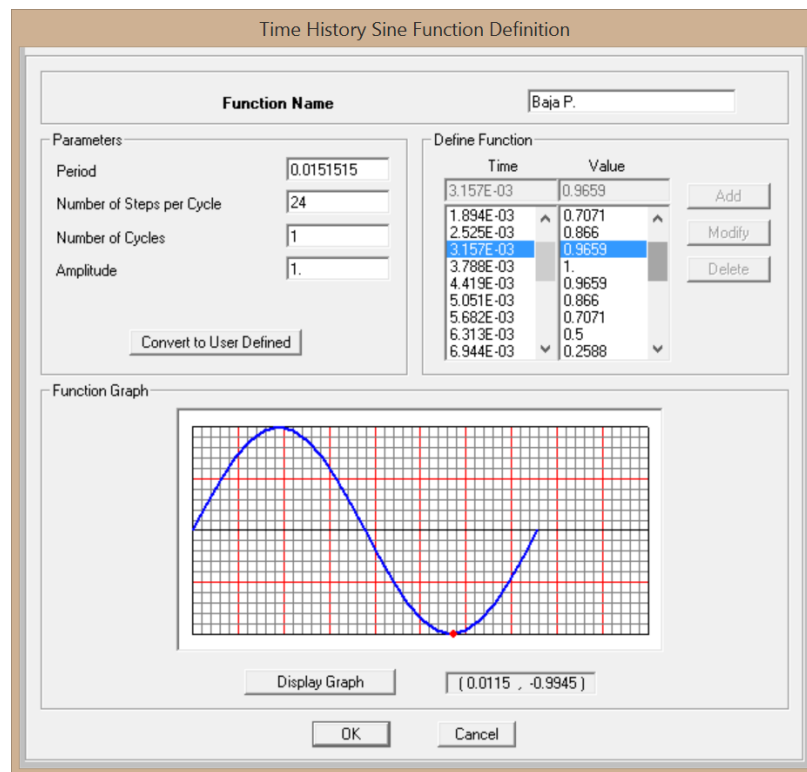
Las cargas quedan asignadas de la siguiente manera:



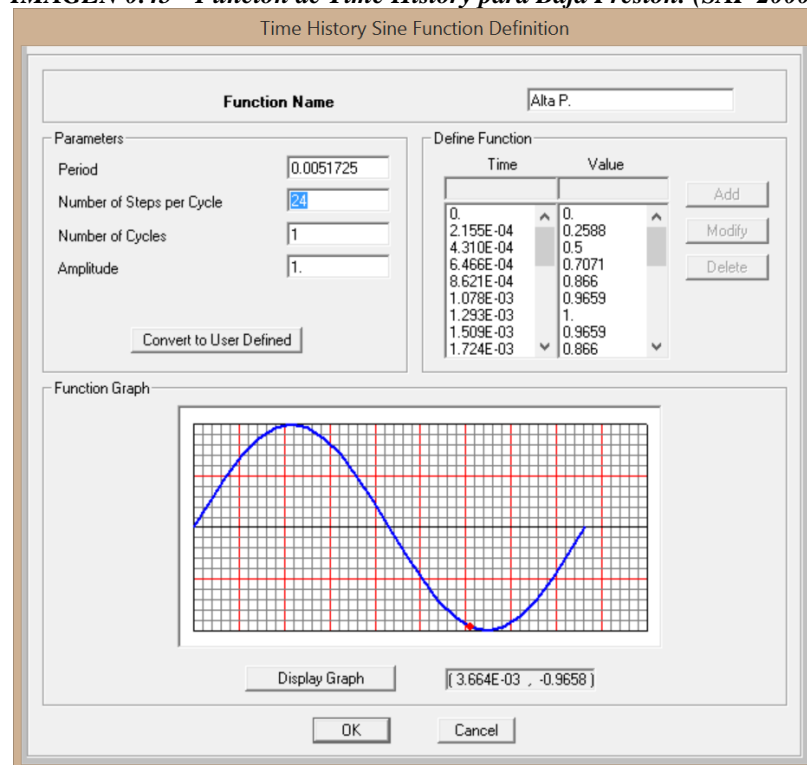
TIME HISTORY			
	RPM	Hz	T(seg)
Baja Presión	3960	66	0.01515152
Alta Presión	11600	193.33	0.0051725

BAJA PRESIÓN	
Tiempo	Valor
0	0.0000
0.00063131	0.2588
0.00126263	0.5000
0.00189394	0.7071
0.00252525	0.8660
0.00315657	0.9659
0.00378788	1.0000
0.00441919	0.9659
0.00505051	0.8660
0.00568182	0.7071
0.00631313	0.5000
0.00694444	0.2588
0.00757576	0.0000
0.00820707	-0.2588
0.00883838	-0.5000
0.0094697	-0.7071
0.01010101	-0.8660
0.01073232	-0.9659
0.01136364	-1.0000
0.01199495	-0.9659
0.01262626	-0.8660
0.01325758	-0.7071
0.01388889	-0.5000
0.0145202	-0.2588
0.01515152	0.0000

ALTA PRESIÓN	
Tiempo	Valor
0	0.0000
0.00021552	0.2588
0.00043104	0.5000
0.00064656	0.7071
0.00086208	0.8660
0.0010776	0.9659
0.00129313	1.0000
0.00150865	0.9659
0.00172417	0.8660
0.00193969	0.7071
0.00215521	0.5000
0.00237073	0.2588
0.00258625	-0.0001
0.00280177	-0.2589
0.00301729	-0.5001
0.00323281	-0.7072
0.00344834	-0.8661
0.00366386	-0.9659
0.00387938	-1.0000
0.0040949	-0.9659
0.00431042	-0.8660
0.00452594	-0.7070
0.00474146	-0.4999
0.00495698	-0.2587
0.0051725	0.0001



**IMAGEN 0.45 - Función de Time History para Baja Presión. (SAP 2000)**

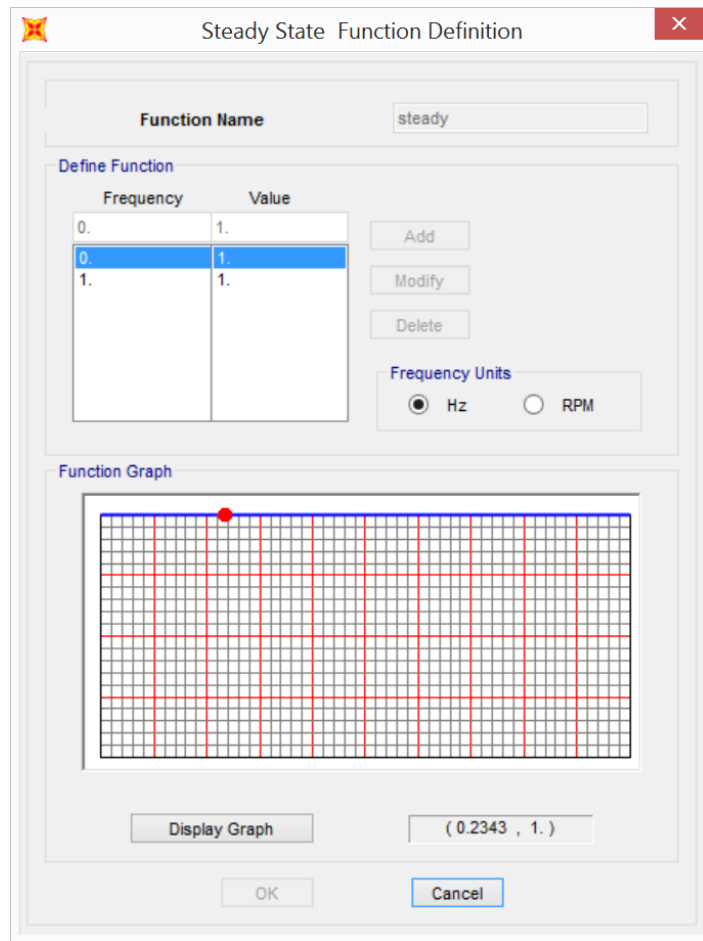


**IMAGEN 0.46 - Función de Time History para Alta Presión. (SAP 2000)**

- Funciones para Steady State

Se definen funciones sinusoidales tanto para altas y bajas velocidades de operación, considerando un periodo específico para cada caso, dividido en 24 etapas para realizar su análisis. Para el modelo se utilizarán los datos obtenidos de frecuencia (rpm) y periodo (seg).

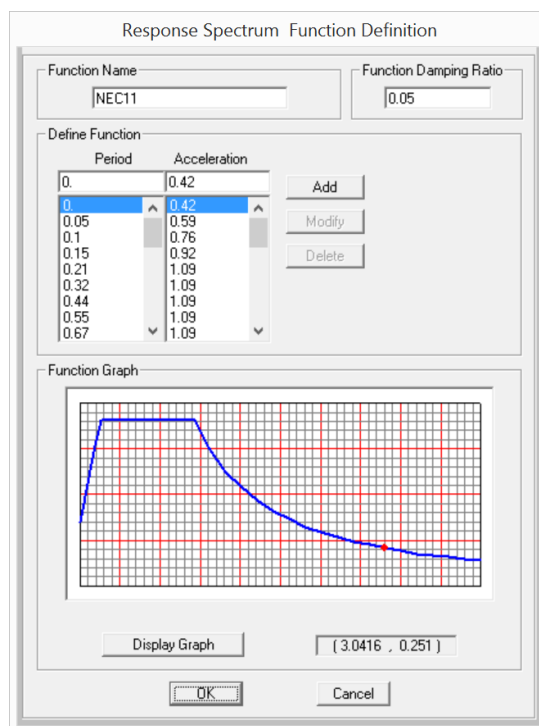
La herramienta Steady State permite realizar un análisis en función de una lista de valores obtenidos a partir de la frecuencia de excitación, mediante valores de aceleración del suelo, o de igual manera multiplicadores de los efectos de los patrones de las fuerzas sobre la cimentación.



**IMAGEN 0.47 - Función de Steady State. (SAP 2000)**

#### 4.11.7.9 Definición del espectro de respuesta sísmico.

Se define el espectro de respuesta mediante la Norma Ecuatoriana de la Construcción.



**IMAGEN 0.48 - Espectro de respuesta sísmico. (SAP 2000)**

La fuerza basal calculada en la sección 4.11.3.4 se ingresa al análisis mediante fuerzas en cada sentido con el coeficiente de W.

User Defined Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☒ Global X Direction  
☐ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)      0.05

Override Diaph. Eccen.      Override...

Other Factors

Base Shear Coefficient, C      0.711

Building Height exp., K      1.

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated  
☐ User Specified      Reset Defaults

Max Z        
Min Z     

Buttons: OK, Cancel

**IMAGEN 0.49 - Definición de fuerzas sísmicas. (SAP 2000)**

#### 4.11.8 *Análisis de resultados del modelo.*

##### 4.11.8.1 *Análisis Modal*

Al analizar los datos obtenidos en el análisis modal en 20 pasos se identifica que eran necesarios únicamente 10 pasos, puesto que a partir del paso 11 la participación de la masa es casi completa.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	Unitless	Unitless
MODAL1	Mode	1	3.358169	0.2977813	5.97E-13	0.803
MODAL1	Mode	2	2.190815	0.4564511	0.988	0.803
MODAL1	Mode	3	1.653586	0.6047461	0.988	0.803
MODAL1	Mode	4	1.143234	0.8747112	0.988	0.989
MODAL1	Mode	5	0.901885	1.1087882	0.988	0.989
MODAL1	Mode	6	0.834509	1.1983094	0.988	0.989
MODAL1	Mode	7	0.601847	1.6615528	0.988	0.994
MODAL1	Mode	8	0.530937	1.8834614	0.995	0.994
MODAL1	Mode	9	0.475735	2.1020108	0.995	0.994
MODAL1	Mode	10	0.417496	2.3952308	0.995	0.994
MODAL1	Mode	11	0.393017	2.5444191	0.995	0.995
MODAL1	Mode	12	0.37907	2.6380328	0.995	0.995
MODAL1	Mode	13	0.335705	2.9788079	0.995	0.996
MODAL1	Mode	14	0.326196	3.0656418	0.995	0.996
MODAL1	Mode	15	0.324749	3.0793034	0.995	0.996
MODAL1	Mode	16	0.318378	3.1409185	0.996	0.996
MODAL1	Mode	17	0.317009	3.1544861	0.996	0.996
MODAL1	Mode	18	0.310603	3.2195474	0.996	0.996
MODAL1	Mode	19	0.295865	3.379925	0.996	0.996
MODAL1	Mode	20	0.292904	3.414086	0.996	0.996

**TABLA 0.24 - Resultados del Análisis Modal. (Luca Limaico)**



#### 4.11.8.2 Análisis Dinámico

A continuación se analizarán los datos de velocidades obtenidos mediante las funciones de Time History y Steady State tanto para alta como para baja presión, pues dichos datos reflejan el comportamiento de la cimentación ante esfuerzos dinámicos.

La velocidad máxima para la sustentación está dada por la literatura y se encuentra limitada en 0.1 mm/seg; la velocidad se calcula a partir de los datos proporcionados

por el programa SAP 2000 mediante la expresión,  $V = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ .

- Velocidad con Función Time History de Alta Presión

TABLE: Joint Velocities - Absolute								
Joint	OutputCase	CaseType	Step Type	U1	U2	U3	Velocidad	Vel. Maxima
Text	Text	Text	Text	Mm /sec	mm/sec	mm/sec	(mm/seg)	(mm/seg)
1584	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-1.072E-09	-1.196E-09	-3.995E-16	1.6061E-09	1.6061E-09
1584	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	1.073E-09	1.194E-09	3.999E-16	1.6053E-09	
1585	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-9.739E-10	-1.267E-09	-1.047E-17	1.5981E-09	1.5981E-09
1585	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	9.75E-10	1.266E-09	1.046E-17	1.5979E-09	
1586	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-9.234E-10	-1.271E-09	-1.176E-16	1.571E-09	1.571E-09
1586	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	9.244E-10	1.27E-09	1.174E-16	1.5708E-09	
1587	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	1.141E-09	1.075E-09	8.938E-17	1.5676E-09	1.5676E-09
1587	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-1.14E-09	-1.076E-09	-8.927E-17	1.5676E-09	
1588	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-8.503E-10	-1.294E-09	-1.855E-16	1.5484E-09	1.5484E-09
1588	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	8.513E-10	1.293E-09	1.853E-16	1.5481E-09	
1589	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-8.561E-10	-1.289E-09	-2.624E-16	1.5474E-09	1.5474E-09
1589	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	8.571E-10	1.288E-09	2.627E-16	1.5471E-09	
1590	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-9.803E-10	-1.196E-09	-3.869E-16	1.5464E-09	1.5464E-09
1590	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	9.814E-10	1.194E-09	3.873E-16	1.5456E-09	
1591	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-8.684E-10	-1.248E-09	-4.714E-17	1.5204E-09	1.5204E-09
1591	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	8.694E-10	1.247E-09	4.719E-17	1.5202E-09	
1592	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-8.263E-10	-1.272E-09	-2.659E-17	1.5168E-09	1.5168E-09
1592	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	8.273E-10	1.27E-09	2.662E-17	1.5157E-09	
1593	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	1.166E-09	9.182E-10	1.274E-17	1.4841E-09	1.4841E-09
1593	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-1.165E-09	-9.193E-10	-1.272E-17	1.484E-09	

**TABLA 0.255 Velocidades máximas con Función Time History de Alta Presión**

Fuente: (Luca Limaico)

- Velocidad con Función Time History de Baja Presión

TABLE: Joint Velocities - Absolute								
Joint	OutputCase	CaseType	Step Type	U1	U2	U3	Velocidad	Vel. Maxima
Text	Text	Text	Text	mm/sec	mm/sec	mm/sec	(mm/seg)	(mm/seg)
1650	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-3.463E-09	-3.874E-09	-1.291E-15	5.1962E-09	5.19618E-09
1650	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	3.475E-09	3.86E-09	1.295E-15	5.1938E-09	
1653	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-3.147E-09	-4.104E-09	-3.351E-17	5.1717E-09	
1653	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	3.158E-09	4.089E-09	3.339E-17	5.1665E-09	
1652	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-2.983E-09	-4.117E-09	-3.802E-16	5.0841E-09	
1652	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	2.994E-09	4.103E-09	3.788E-16	5.0792E-09	
1647	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	3.695E-09	3.473E-09	2.898E-16	5.071E-09	
1647	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-3.682E-09	-3.486E-09	-2.887E-16	5.0704E-09	
1655	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-2.747E-09	-4.192E-09	-6.002E-16	5.0119E-09	
1656	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-2.766E-09	-4.176E-09	-8.479E-16	5.009E-09	
1655	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	2.757E-09	4.177E-09	5.98E-16	5.0048E-09	
1649	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-3.167E-09	-3.873E-09	-1.25E-15	5.003E-09	
1656	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	2.776E-09	4.161E-09	8.509E-16	5.002E-09	
1649	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	3.179E-09	3.86E-09	1.254E-15	5.0006E-09	
1651	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-2.806E-09	-4.043E-09	-1.524E-16	4.9213E-09	
1651	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	2.816E-09	4.028E-09	1.529E-16	4.9147E-09	
1654	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-2.67E-09	-4.119E-09	-8.617E-17	4.9087E-09	
1654	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	2.679E-09	4.104E-09	8.647E-17	4.901E-09	
1644	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	3.777E-09	2.967E-09	4.127E-17	4.803E-09	
1644	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-3.763E-09	-2.978E-09	-4.112E-17	4.7988E-09	

**TABLA 0.266 Velocidades máximas con Función Time History de Baja Presión**

Fuente: (Luca Limaico)

Los desplazamientos están limitados por la expresión  $D = \frac{0.1 \text{ mm/s}}{w}$ , de la que se

obtiene un desplazamiento admisible de 0.05 mm. Los desplazamientos se controlan con las funciones Time History y Steady State tanto en alta como en baja presión, para

obtener un desplazamiento total se utilizará la expresión  $D = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ ;

analizando los datos se obtiene:

- Desplazamientos con función Steady State de Alta Presión

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	Desplazamientos	Desp. Max.
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
1620	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000002907	0.000002907	0.000002907
1620	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000002907	0.000002907	
1622	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000002895	0.000002895	
1622	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000002895	0.000002895	
1617	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000002761	0.000002761	
1617	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000002761	0.000002761	
1615	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000002745	0.000002745	
1615	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000002745	0.000002745	
1607	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001481	0.000001481	
1607	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001481	0.000001481	
1605	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001386	0.000001386	
1605	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001386	0.000001386	
1612	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001325	0.000001325	
1612	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001325	0.000001325	
1600	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001241	0.000001241	
1600	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001241	0.000001241	
1610	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001241	0.000001241	
1610	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001241	0.000001241	
1595	Steady1-AP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000001024	0.000001024	
1595	Steady1-AP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000001024	0.000001024	

**TABLA 0.277 Desplazamientos máximos con función Steady State de Alta Presión**  
Fuente: (Luca Limaico)

- Desplazamientos con función Steady State de Baja Presión.

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	Desplazamientos	Desp. Max.
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
1620	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000025	0.000025	0.000025
1620	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000025	0.000025	
1622	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000025	0.000025	
1622	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000025	0.000025	
1615	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000024	0.000024	
1615	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000024	0.000024	
1617	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000024	0.000024	
1617	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000024	0.000024	
1607	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000013	0.000013	
1607	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000013	0.000013	
1605	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000012	0.000012	

1605	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000012	0.000012
1600	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000011	0.000011
1600	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000011	0.000011
1610	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000011	0.000011
1610	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000011	0.000011
1612	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	0.000011	0.000011
1612	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	0.000011	0.000011
1595	Steady2-BP	LinSteady	Real Max	0	0	8.799E-06	0.000008799
1595	Steady2-BP	LinSteady	Real Min	0	0	8.799E-06	0.000008799

**TABLA 0.288 - Desplazamientos máximos con función Steady State de Baja Presión.**  
Fuente: Luca Limaico

- Desplazamientos con función Time History de Alta Presión.

TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
1650	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	3.271E-19	1.32217E-12	1.32217E-12
1650	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-3.305E-19	1.31938E-12	
1653	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	0	1.31662E-12	
1653	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	0	1.31187E-12	
1652	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	9.754E-20	1.29431E-12	
1652	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-9.578E-20	1.28993E-12	
1647	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	7.323E-20	1.28972E-12	
1647	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-7.372E-20	1.28888E-12	
1655	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	1.536E-19	1.2761E-12	
1656	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	2.148E-19	1.27544E-12	
1649	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	3.167E-19	1.27357E-12	
1655	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-1.514E-19	1.27093E-12	
1656	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-2.172E-19	1.27021E-12	
1649	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-3.201E-19	1.26993E-12	
1651	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	3.863E-20	1.25279E-12	
1654	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	2.192E-20	1.25028E-12	
1651	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-3.896E-20	1.24807E-12	
1654	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-2.186E-20	1.24422E-12	
1644	TimeHis1-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-1.054E-20	1.22115E-12	
1658	TimeHis1-AP	LinModHist	Max	0	0	4.339E-19	1.22066E-12	

**TABLA 0.29 - Desplazamientos máximos con función Time History de Alta Presión.**  
Fuente: Luca Limaico

- Desplazamientos con función Time History de Baja Presión.

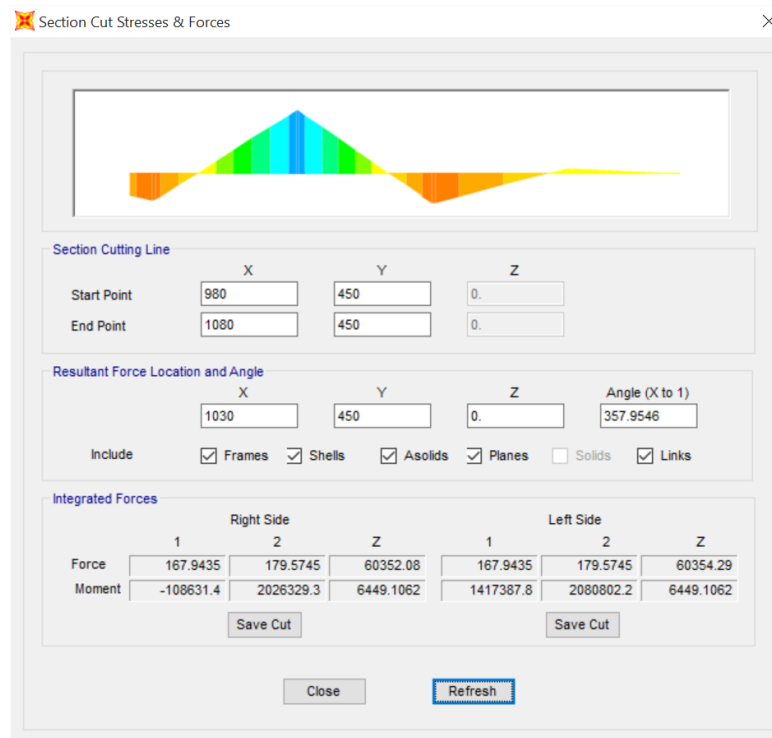
TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
1650	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	3.41E-18	1.37832E-11	1.37832E-11
1650	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-3.443E-18	1.37555E-11	
1653	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	9.11E-20	1.37229E-11	
1653	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-8.619E-20	1.3682E-11	
1652	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	1.014E-18	1.34889E-11	
1647	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	7.643E-19	1.34441E-11	
1652	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-9.973E-19	1.3444E-11	
1647	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-7.69E-19	1.34355E-11	
1655	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	1.599E-18	1.33007E-11	
1656	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	2.24E-18	1.32952E-11	
1649	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	3.302E-18	1.32765E-11	
1655	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-1.577E-18	1.32474E-11	
1656	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-2.262E-18	1.32413E-11	
1649	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-3.335E-18	1.3241E-11	
1651	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	4.03E-19	1.30627E-11	
1654	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	2.291E-19	1.30292E-11	
1651	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-4.062E-19	1.30056E-11	
1654	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-2.285E-19	1.29754E-11	
1644	TimeHis2-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-1.099E-19	1.27281E-11	
1658	TimeHis2-BP	LinModHist	Max	0	0	4.524E-18	1.27218E-11	

**TABLA 0.30 - Desplazamientos máximos con función Time History de Baja Presión.**

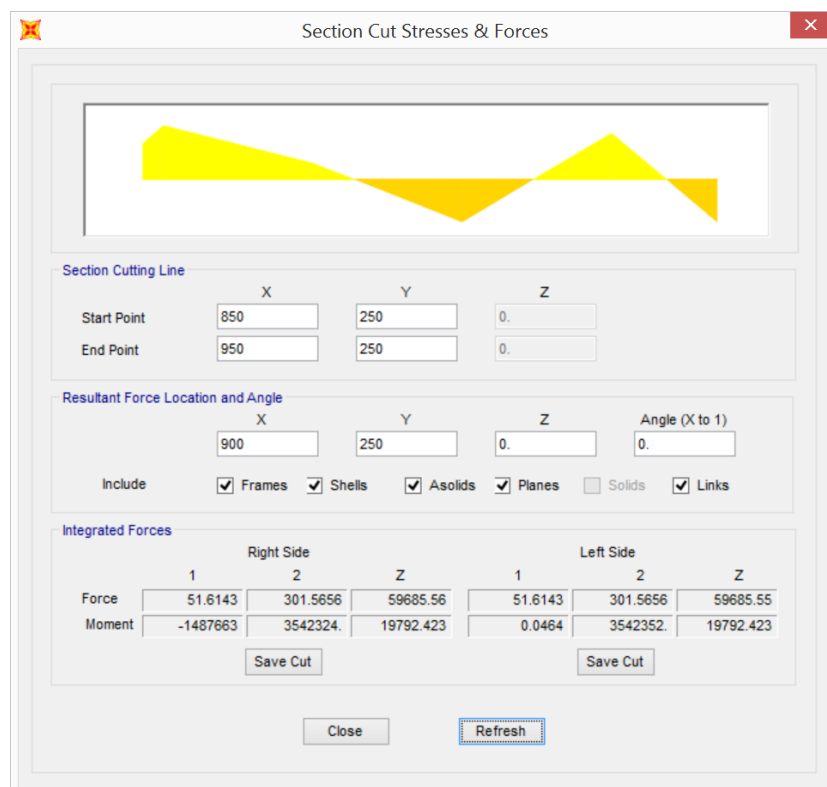
Fuente: Luca Limaico

#### 4.11.8.3 Análisis Estático

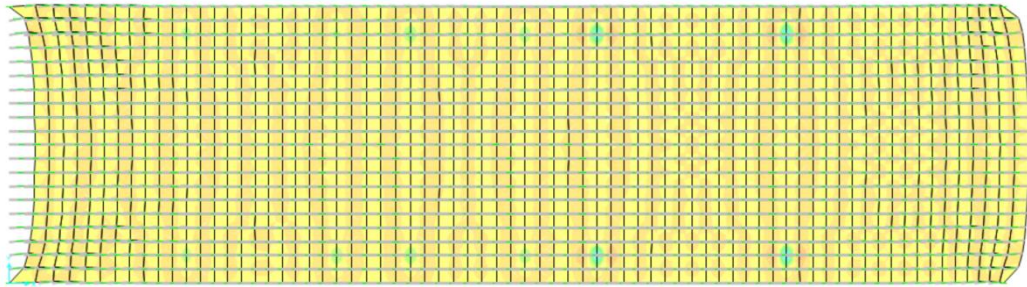
Para el análisis estático de la cimentación se utiliza un caso de carga del tipo envolvente que aglomera todas las combinaciones de diseño. Se realiza el análisis en la parte más crítica de la sustentación analizando los momentos positivos y negativos para el diseño del refuerzo, tanto en sentido longitudinal, como en sentido transversal.



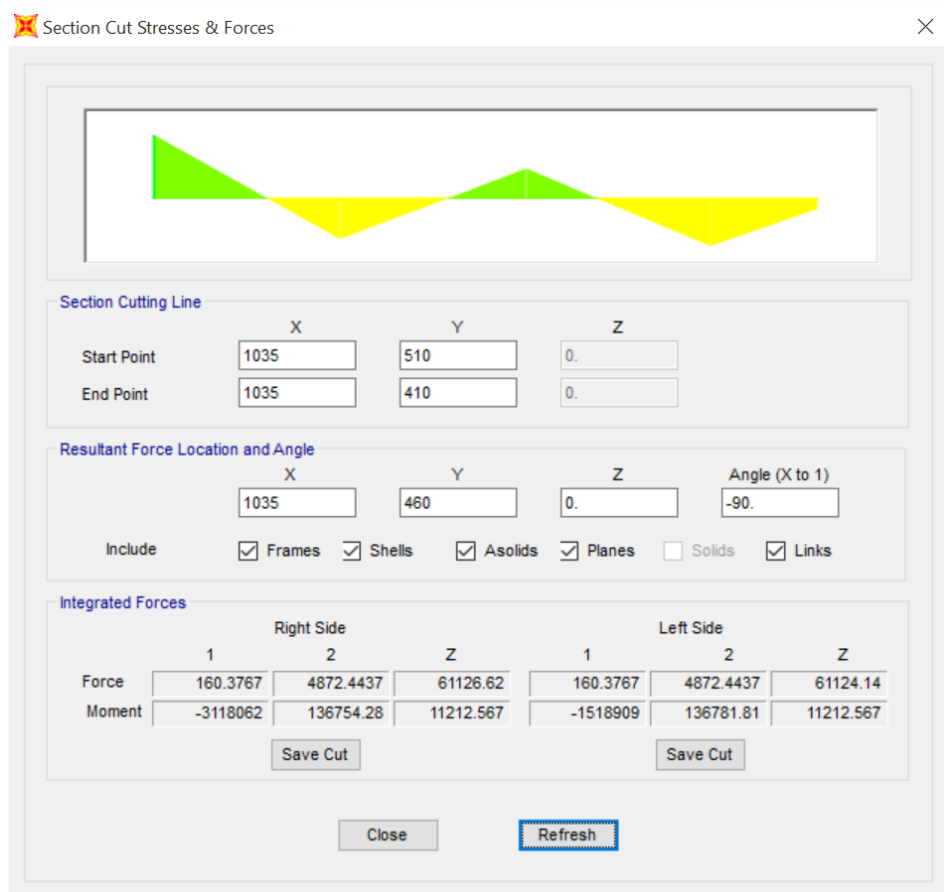
**IMAGEN 0.501 - Diagrama de momentos positivo, Eje Longitudinal. (SAP 2000)**



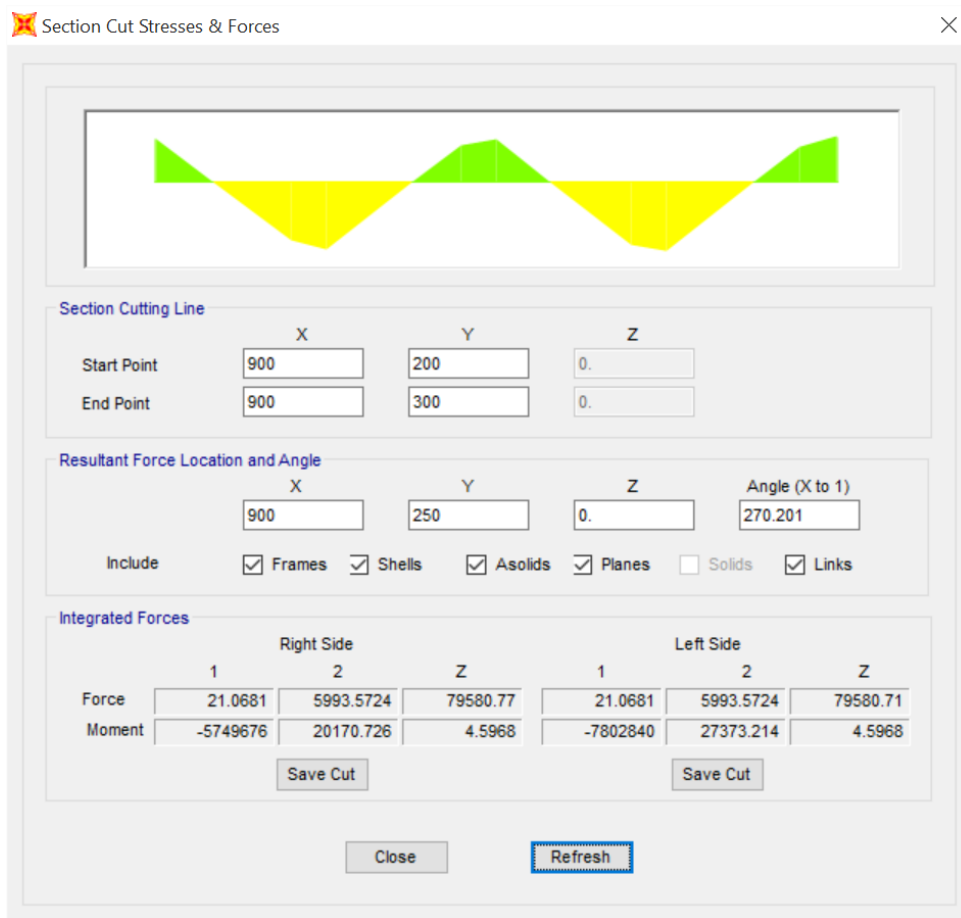
**IMAGEN 0.512 - Diagrama de Momentos Negativo, Eje Longitudinal. (SAP 2000)**



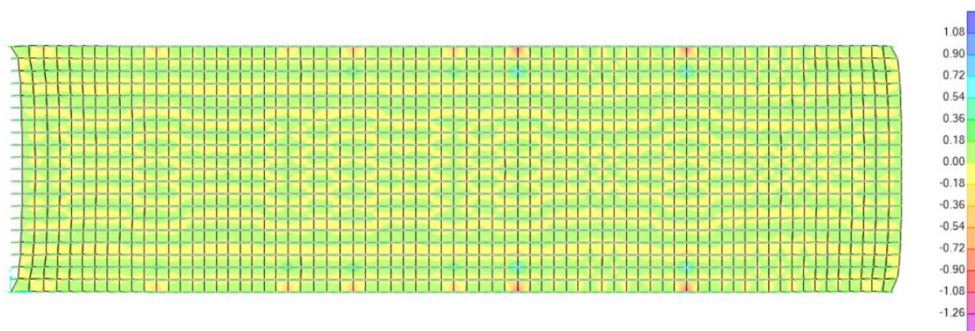
**IMAGEN 0.523 - Esquema general de momentos, Turbogenerador, Eje Longitudinal. (SAP 2000)**



**IMAGEN 0.534 - Diagrama de momentos positivo, Eje Transversal. (SAP 2000)**



**IMAGEN 0.545 - Diagrama de Momentos Negativo, Eje Transversal. (SAP 2000)**



**IMAGEN 0.556 - Esquema general de momentos, Turbogenerador, Eje Transversal. (SAP 2000)**

Los momentos obtenidos del análisis estático se resumen en la siguiente tabla; cabe señalar que los momentos son determinados para un metro de cimentación.



Momentos actuantes sobre la cimentación		
Sentido	Magnitud	
	Positivo T-m	Negativo T-m
M11 (Longitudinal)	19.79	14.87
M12 (Transversal)	27.37	57.49

**TABLA 0.31 - Momentos Máximos Actuantes sobre la cimentación (Luca Limaico)**

Los desplazamientos en los nudos en los que se encuentran aplicadas las fuerzas estáticas del equipo se analizan únicamente en el sentido del eje z, puesto que los desplazamientos laterales son analizados mediante los esfuerzos dinámicos. Se analizan los desplazamientos con el tipo de carga envolvente de servicio puesto que engloba todos los posibles efectos reales actuantes sobre la cimentación. Los desplazamientos especificados son los siguientes:

Coordenadas Plano	Coordenadas SAP2000	Nudo	Caso de Carga	Tipo de Carga	Tipo	Desplazamiento Relativo (mm)
A8	2B	1586	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.088573
A7	2C	1595	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.053491
A6	2D	1600	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.032922
A5	2E	1605	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.019669
A4	2F	1610	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.018138
A3	2G	1615	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.209656
A2	2H	1620	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.01959
A1	2I	1625	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.344085
Desplazamiento Maximo						0.344085
B8	4B	1590	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.100757
B7	4C	1597	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.029905
B6	4D	1602	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.021533
B5	4E	1607	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.098099
B4	4F	1612	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.019107
B3	4G	1617	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.200575
B2	4H	1622	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.015323
B1	4I	1627	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.336478
Desplazamiento Maximo						0.336478

**TABLA 0.292 - Desplazamientos verticales, Turbogenerador. (Luca Limaico)**

#### 4.11.9 *Diseño Estructural.*

Los aceros requeridos son determinados mediante el método de diseño por ultima resistencia, aplicando las formulas descritas en cada paso.

##### 4.11.9.1 *Determinación de la armadura superior.*

<b>Armadura Superior</b>	
Mu =	57.49 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	280 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9 (flexión)
b =	100 cm
d =	100 cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2Mu}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 5749000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 15.42 \text{ cm}^2/\text{m}$$

##### 4.11.9.2 *Determinación de la armadura inferior.*

<b>Armadura Superior</b>	
Mu =	27.37 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	280 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9 (flexión)
b =	100 cm
d =	100 cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2M_u}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 2737000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 7.29 \text{ cm}^2/\text{m}$$

#### 4.11.9.3 Momento Resistente por cuantía mínima.

Cuantía Mínima	
Mu =	96.6 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	280 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9
b =	100 Cm
d =	100 Cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2M_u}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 9676000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 280 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 26.16 \text{ cm}^2/\text{m}$$

#### Mínima Cuantía:

$$\rho_{min} = 0.0018 = \rho$$

$$A_{min} = 18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

### Máxima Cuantía:

$$\rho_{max} = 0.5\rho_{balanceado}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'_c}{F_y} * \frac{0.003}{\frac{F_y}{E_s} + 0.003}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.85 * 0.85 * \frac{280 \text{ Kg/cm}^2}{4200 \text{ Kg/cm}^2} * \frac{0.003}{\frac{4200 \text{ Kg/cm}^2}{2100000 \text{ Kg/cm}^2} + 0.003}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.0289$$

$$\rho_{max} = 0.01445$$

Si se cumple la desigualdad  $\rho < \rho_{max}$  , entonces el diseño de los aceros es aceptable.

$$0.0018 < 0.01445 \therefore \text{Diseño Correcto}$$

#### 4.11.9.4 Aceros de refuerzo por flexión.

Por lo tanto se utilizan los aceros que cumplan con los requerimientos de aceros mínimos, considerando que son los requerimientos estructurales más altos obtenidos:

- 1  $\phi$  20 mm @ 20 cm, en la parte superior e inferior de la cimentación en sentido longitudinal.
- 1  $\phi$  20 mm @ 20 cm, en la parte superior e inferior de la cimentación en sentido transversal.

#### 4.11.9.5 Diseño por Corte

$F_y =$	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
$f'_c =$	280 Kg/cm <sup>2</sup>
$\phi =$	0.85
$V_u =$	24.56 Ton (Envolvente de diseño)

$$v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$$

$$v_c = 0.53\sqrt{280 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$v_c = 8.87 \text{ Kg/cm}^2$$

$$V_c = v_c * b * d$$

$$V_c = 8.87 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}$$

$$V_c = 88.7 \text{ Ton}$$

$$V_s = \frac{V_u - \phi * V_c}{\phi}$$

$$V_s = \frac{24.56 \text{ Ton} - 0.85 * 88.7 \text{ Ton}}{0.85}$$

$$V_s = 59.81 \text{ Ton}$$

$$A_v = \frac{V_s * S}{F_y * d}$$

$$A_v = \frac{59.81 \text{ Ton} * 1000 * 67.5 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm}}$$

$$A_v = 9.61 \text{ cm}^2$$

Sin embargo de haber obtenido un área de aceros por corte de 9.61 cm<sup>2</sup>, se colocarán estribos  $\phi$  12 mm por cumplir las recomendaciones existentes para de este tipo de estructuras en la literatura especializada. Por lo tanto:

- 1E  $\phi$  12 mm @ 20 cm, en los ejes de la cimentación en sentido longitudinal.
- 1E  $\phi$  12 mm @ 20 cm, en los ejes de la cimentación en sentido transversal.

#### 4.11.9.6 Control de Agrietamiento.

Se requiere determinar un área mínima de acero para evitar el agrietamiento del hormigón, para la cual se utiliza la expresión:

$$\sigma = \frac{M_{ag} * c}{I}$$

Donde,

$\sigma = f_t$  = Fuerza resistente del hormigón a tracción.

$c$  = Distancia de la fibra mas externa al eje neutro.

$$f_t = 13\%f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2 = 36.4 \text{ Kg/cm}^2$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{100 \text{ cm} * (120 \text{ cm})^3}{12} = 14400000 \text{ cm}^4$$

$$M_{ag} = \frac{F_t * I}{c} = \frac{36.4 \text{ Kg/cm}^2 * 14400000 \text{ cm}^4}{60 \text{ cm}} = 87.36 \text{ Tm}$$

Ya que el momento por agrietamiento ( $M_{ag}$ ) es menor al momento resistente, se determina que la armadura propuesta anteriormente, es suficiente para soportar los efectos del agrietamiento sobre el hormigón.

#### **4.12 Diseño de la cimentación de una IMPRENTA Modelo SX103-8P HEILDELBURG.**

Se realiza el diseño total de la sustentación de la prensa Heidelberg modelo SX103-8P, obteniéndose los datos de diseño de la ficha técnica proporcionada por el fabricante. Considerando su análisis, diseño estructural y modelación.

El esquema de la maquina se especifica en la imagen 4.53. El fabricante recomienda una losa de cimentación armada para la cimentación, que soporte asentamientos, desplazamientos, etc.

La máquina posee tres componentes esenciales: Marcador Preset Plus, Cuerpo impresor con dispositivo inversor, Salida Preset Plus sin módulo de prolongación con sus respectivos pesos.

##### **4.12.1**      *Materiales*

Para la losa de hormigón armado el fabricante estipula la utilización de hormigón con una resistencia de por lo menos C30/37 según el Euro Código 206/1, equivalente a un hormigón de  $f'c = 320 \text{ Kg/cm}^2$  y acero grado 60 con un  $fy = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ .

#### **4.12.2**      *Códigos y reglamentos a utilizarse.*

- Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011 (NEC 2011)
- ACI 351.3R-04 “Foundations for Dynamic Equipment” (Cimentaciones para Equipo Dinámico)
- ASCE-7 98.
- REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL.

#### **4.12.3**      *Cargas.*

Las cargas estáticas, dinámicas, de viento y de sismo son determinadas por el fabricante del equipo Heidelberg en términos de magnitud, dirección y sentido.

El peso propio del sistema maquinaria-cimentación es obtenido gracias al análisis y diseño final.

Las cargas muertas, de operación, viento se especifican en el apartado 4.9.3 del presente documento.



#### 4.12.3.1 Cargas de Sismo.

Las cargas de sismo para la estructura se determinan mediante la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC), capítulo 2, peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente.

Se Determina el cortante basal mediante la expresión 4.61.

$$V_{NEC} = \frac{IS_a}{R\phi_E\phi_P} W \quad \text{Ec.0.61}$$

➤ Factor de Importancia:

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Factor
Edificaciones esenciales y/o peligrosas	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

**TABLA 0.33 - Factor de Importancia de una estructura. (NEC, 2013)**

I=	1
----	---

➤ Determinación del factor  $S_a$ :

Para la determinación de  $S_a$  se utiliza las formulas especificadas en la imagen 4.32.

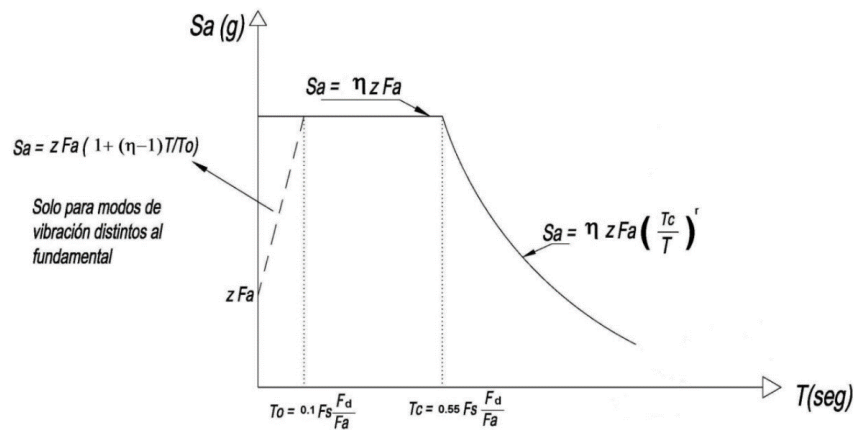


IMAGEN 0.56 -Factor  $S_a$ . (NEC, 2013)

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $> \bar{V}_s \geq 760$ m/s
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s $> \bar{V}_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50.0$ $\bar{S}_u \geq 100$ KPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s $> \bar{V}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15.0$ $100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> ) $> \bar{S}_u \geq 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$\bar{V}_s < 180$ m/s
	perfil que contiene un espesor total $H$ mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $\bar{S}_u < 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista (Ver 2.5.4.9). Se contemplan las siguientes subclases: <b>F1</b> —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. <b>F2</b> —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( $H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). <b>F3</b> —Arcillas de muy alta plasticidad ( $H > 7.5$ m con índice de Plasticidad $IP > 75$ ) <b>F4</b> —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( $H > 30$ m) <b>F5</b> —Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte. <b>F6</b> —Rellenos colocados sin control ingenieril.	

TABLA 0.3430 - Clasificación del tipo de Suelo (NEC, 2013)

Coeficiente r	
TIPO DE SUELO	R
A, B O C.	1
D, E	1.5

**TABLA 0.35 - Coeficientes de r. (NEC, 2013)**

Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Factor Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	$\geq 0.5$
Amenaza Sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

**TABLA 0.3631 - Factores de Zona Sísmica (NEC, 2013).**

Coeficiente $\eta$	
PROVINCIAS	$\eta$
Costa, excepto Esmeraldas	1.8
Sierra, Esmeraldas y Galápagos	2.48
Oriente	2.6

**TABLA 0.37 - Coeficientes de  $\eta$  (NEC, 2013).**

Valores	
Tipo de Suelo	C
r =	1.0
Z =	0.4
$\eta$ =	2.48

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1	1	1	1	1	1
C		1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D		1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E		1.8	1.5	1.39	1.26	1.14	0.97
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

**TABLA 0.38 - Tipo de suelo y factores de sitio  $F_a$ . (NEC, 2013)**

$F_a$ =	1.2
---------	-----

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B		1	1	1	1	1	1
C		1.6	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
D		1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
E		2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

**TABLA 0.329 - Tipo de suelo y factores de sitio  $F_d$  (NEC, 2013).**

$F_d =$	1.3
---------	-----

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
	valor Z (Aceleración esperada en roca, 'g)	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B		0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C		1	1.1	1.2	1.25	1.3	1.45
D		1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.65
E		1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F		ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota	ver nota

Nota: Para los suelos tipo F no se proporcionan valores de  $F_a$ ,  $F_d$  ni de  $F_s$ , debido a que requieren un estudio especial, conforme lo estipula la sección 2.5.4.9.

**TABLA 0.40 - Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$ . (NEC, 2013)**

$F_s =$	1.3
---------	-----

$T_o =$	0.14083
---------	---------

$T_c =$	0.77458
---------	---------

$T =$	0.912
-------	-------

$S_a =$	1.01074
---------	---------

Valores del coeficiente de reducción de respuesta estructural R, Sistemas Estructurales Dúctiles	
Sistemas Duales	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras, sean de hormigón o acero laminado en caliente.	7
Pórticos de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	7
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas).	7
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.	6
Pórticos resistentes a momentos	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	6
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	6
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	6
Otros sistemas estructurales para edificaciones	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

**TABLA 0.41 - Coeficiente de reducción de respuesta estructural R (NEC, 2013)**

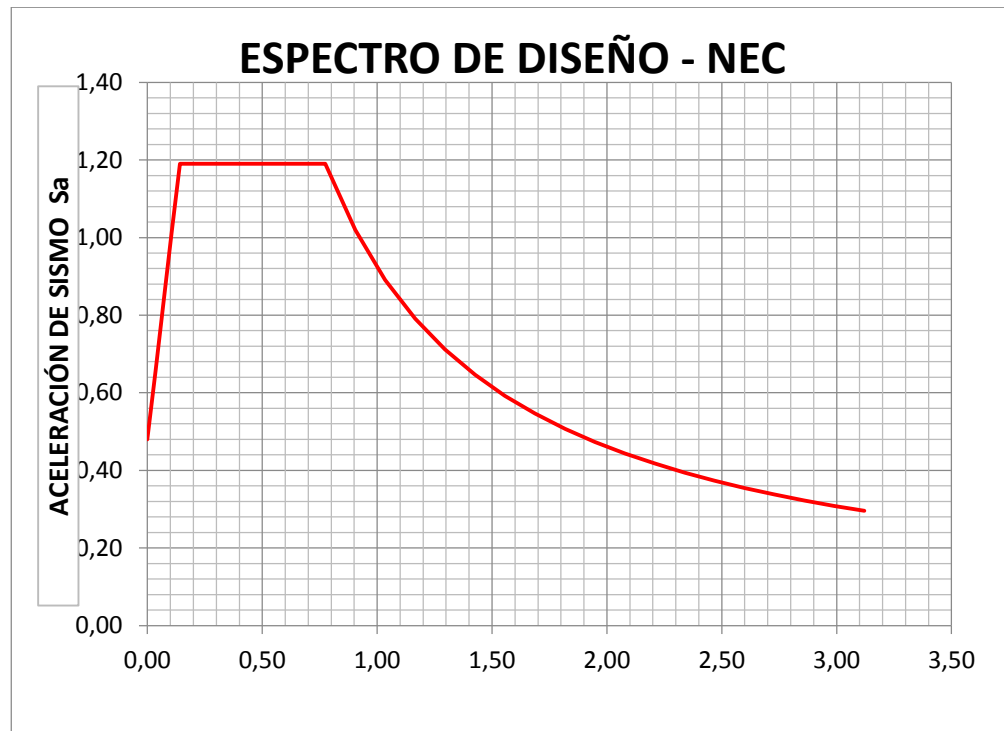
R= 5

IRREGULARIDAD EN PLANTA			
TIPO	DESCRIPCIÓN		
1	Torsión en planta		
2	Retrocesos excesivos en esquinas		
3	Discontinuidades en el sistema de piso		
4	Ejes estructurales no paralelos		
Colocar 0.9 si existe - 1.0 si no existe			
TIPO			
1,2,3	$\phi_{PA} =$	1	
4	$\phi_{PB} =$	1	
$\phi_P =$		1	

IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN			
TIPO	DESCRIPCIÓN		
1	Piso débil		
2	Concentración de masas		
3	Irregularidad geométrica		
Colocar 0.9 si existe - 1.0 si no existe			
TIPO			
1	$\phi_{EA} =$	1	
2,3	$\phi_{EB} =$	0.9	
$\phi_E =$		0.9	

$$V_{NEC} = \frac{1 * 1.01074}{5 * 1 * 0.9} W$$

$$V_{NEC} = 0.2246 * W$$



**IMAGEN 0.57 - Espectro de Diseño NEC - Imprenta.**

#### **4.12.4 Combinaciones de Cargas.**

Las combinaciones de carga que se utilizarán serán obtenidas del código ACI 318S-08.

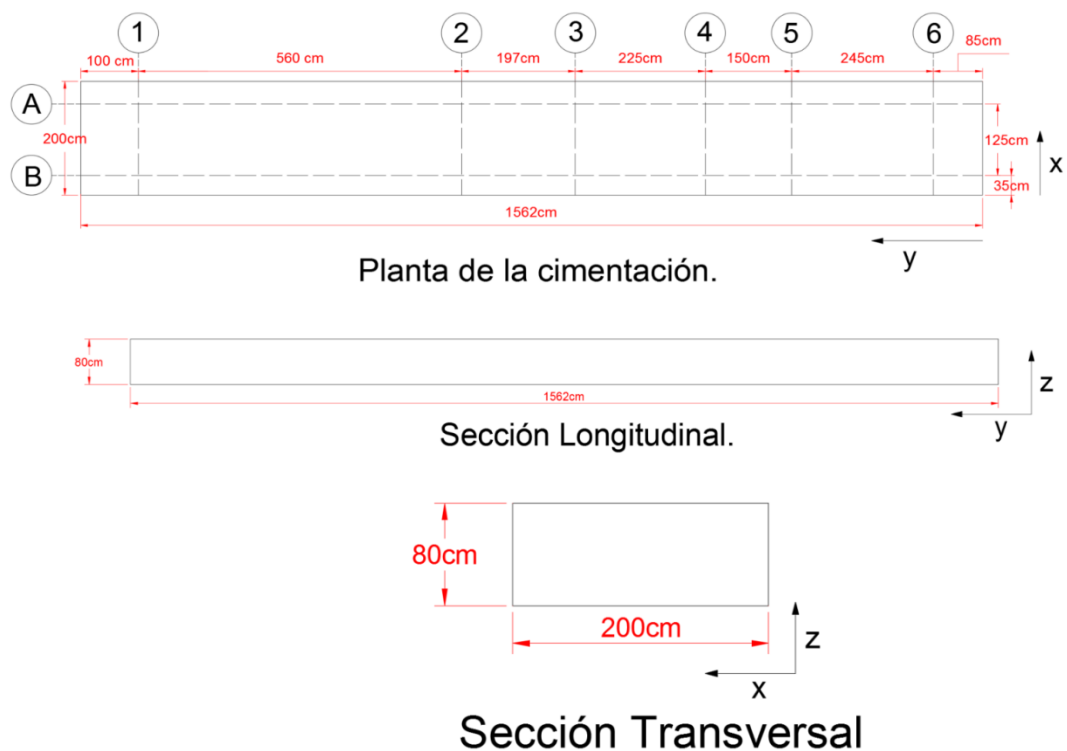
1	1.4 D + 1.7 Steady1-AP
2	1.4 D + 1.7 Steady2-BP
3	1.4 D + 1.7 TimeHis1-AP
4	1.4 D + 1.7 TimeHis2-BP
5	1.2 D + 1.6 Steady1-AP
6	1.2 D + 1.6 Steady2-BP
7	1.2 D + 1.6 TimeHis1-AP
8	1.2 D + 1.6 TimeHis2-BP
9	1.2 D + 1.0 Steady1-AP
10	1.2 D + 1.0 Steady2-BP

11	1.2 D + 1.0 TimeHis1-AP
12	1.2 D + 1.0 TimeHis2-BP
13	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 Steady1-AP
14	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 Steady2-BP
15	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 TimeHis1-AP
16	1.2 D + 1.0 SISMO + 1.0 TimeHis2-BP
17	0.9 D + 1.0 SISMO

**TABLA 0.42 -Combinaciones de Carga a Utilizarse-Impronta (Luca Limaico)**

Para el análisis de los datos se utilizarán combinaciones con cargas únicamente de servicio, es decir, cargas que reflejen la masa del sistema cimentación-equipos sin coeficientes de mayoración.

#### 4.12.5 Geometría de la cimentación.



**IMAGEN 0.58 - Geometría de la Cimentación. (Luca Limaico)**

#### 4.12.6 Análisis Pseudo-Dinamico de la cimentación.

El analisis pseudo estático se realiza a partir de la consideracion de los puntos de descarga de la cimentación proporcionados por el fabricante del equipo. Siguiendo los procedimientos propuestos po la American Concrete Institute (ACI) en la norma ACI 351.3R-04 y el manual de cimientos de maquinas publicado por Structural Engineering Research Centre (Centro de Centro de Investigación en Ingeniería Estructural).

#### DATOS:

##### Maquinaria

Cimentación:	L =	1562.00	cm
	B =	200.00	cm
	L7 =	100.00	cm
	L6 =	560.00	cm
	L5 =	197.00	cm
	L4 =	225.00	cm
	L3 =	150.00	cm
	L2 =	245.00	cm
	L1 =	85.00	cm
	H =	80.00	cm

##### Frecuencia de operación

fo = 33.33 ciclo/seg

Velocidad (Wo) = 2000 rpm

Wo>1000, Equipo de Alta Velocidad

CARGAS						
PUNTO	CARGA ESTÁTICA		CENTRO DE DESCARGAS			
	Py					
	kips	ton	Yi (cm)	P Yi	Xi (cm)	P Xi
1-A	28.80	13.063	1462.000	190.981	160.000	20.901
1-B	28.80	13.063	1462.000	190.981	35.000	4.572
2-A	11.70	5.307	902.000	47.869	160.000	8.491
2-B	11.70	5.307	902.000	47.869	35.000	1.857
3-A	11.96	5.425	705.000	38.246	160.000	8.680
3-B	10.58	4.799	705.000	33.833	35.000	1.680
4-A	19.33	8.768	480.000	42.086	160.000	14.029
4-B	17.10	7.756	480.000	37.229	35.000	2.715
5-A	20.00	9.072	330.000	29.938	160.000	14.515



5-B	20.00	9.072	330.000	29.938	35.000	3.175
6-A	10.00	4.536	85.000	3.856	160.000	7.258
6-B	10.00	4.536	85.000	3.856	35.000	1.588
TOTAL	199.97	90.704		696.682		89.461

Centro de la LOSA  $X_g = 1.00 \text{ m}$   $Y_g = 7.81 \text{ m}$

Centro de DESCARGA  $X_d = 0.986 \text{ m}$   $Y_d = 7.681 \text{ m}$

#### CHEQUEO DE EXCENTRICIDAD

Límite de excentricidad  $e \leq 5\%$  respecto a las dimensiones en el eje de calculo

$e_x = X_g - X_d = 0.01 \text{ m} = 0.69 \%$  OK  
 $e_y = Y_g - Y_d = 0.129 \text{ m} = 0.83 \%$  OK

#### PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL SUELO

De la ecuación:

$$r_o = \sqrt{\frac{At}{\pi}}$$

Bloque de cimentación =  $2a \times 2b$

a =	781 cm
b =	100 cm

Traslación

$$r_o = \sqrt{\frac{4 * a * b}{\pi}} = 315.34 \text{ cm}$$

Cabeceo

$$r_o = \sqrt[4]{\frac{16 * a * b^3}{3\pi}} = 190.82 \text{ cm}$$

Torsión

$$r_o = \sqrt[4]{\frac{16ab(a^2 + b^2)}{6\pi}} = 450.26 \text{ cm}$$

Módulo de Cortante  $G = 428.6 \text{ Kg/cm}^2$

Módulo de Poisson  $\nu = 0.3$

Peso Volumétrico  $\gamma = 0.00184 \text{ Kg/cm}^3$

Densidad  $\rho = 2.0E-06 \text{ Kg seg}^2/\text{cm}^3$

#### DETERMINACIÓN DE FRECUENCIAS

Frecuencias admisibles

$$0.6f_o \leq f \leq 1.4f_o$$

0.6 \* fo = 19.998 Hz  
 1.4 \* fo = 46.662 Hz  
 Peso de la Cimentación = 59980.8 Kg

### Vibración Vertical

H cimt = 80.00 cm  
 P. cimt = 59980.8 Kg  
 P. equipo = 90704 Kg  
 Peso TOTAL = 150684.8 Kg  
 L/B = 7.81



### SUELO

Rigidez del resorte Kz

h=Altura o profundidad de empotramiento.

h =	80 cm
$\beta_z$	2.73

$$\eta_z = 1 + 0.6(1 - \nu)(h/r_o) = 1.106551659$$

$$k_z = \frac{G}{1 - \nu} \beta_z \sqrt{BL} \eta_z = 1033817.74 \text{ Kg/cm}$$

Frecuencia natural vertical fn

Masa del sistema (P. Total/g) = 153.6033 kg seg<sup>2</sup>/cm

Gravedad (g) = 9.81 m/seg<sup>2</sup>

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} =$$

13.05695 ciclos/seg

OK

Tn = 0.076588 seg

### Vibración Horizontal

### SUELO

Rigidez del resorte Kx

h=Altura o profundidad de empotramiento.

h =	80 cm
$\beta_x$	2.18

$$\eta_x = 1 + 0.55(2 - \nu)(h/r_o) = 1.237204287$$

$$k_x = 2(1 + \nu)G\beta_x \sqrt{BL} \eta_x = 1679882.62 \text{ Kg/cm}$$

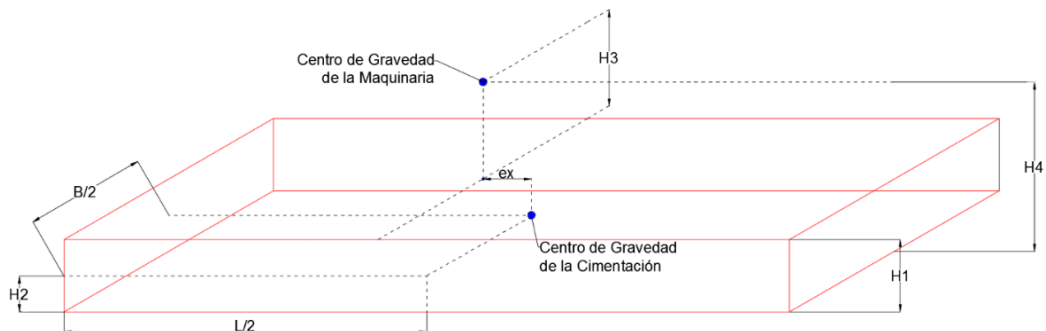
Frecuencia natural vertical  $f_n$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}} =$$

16.64406 ciclos/seg OK

$T_n =$  0.060081 seg

Vibración de Balanceo



H1 =	80	cm
H2 =	40	cm
H3 =	68.5	cm
H4 =	148.5	cm

Centro de Gravedad del Equipo

m. equipo ( $m_e$ ) = 92.461  $kg \text{ seg}^2/cm$

Momento de Inercia del equipo

$$I_{e_{x,z}} = m_e * H_4^2 = 2038973.087 \text{ } kg \text{ seg}^2 \text{ cm}$$

m. cimentación = 61.1425

Momento de Inercia de la cimentación

$$I_{bz} = \frac{m_b}{12} (L^2 + H_{1b}^2) + m_b \left( \frac{H_{1b}}{2} \right)^2 = 12561950.8$$

$$I_{bx} = \frac{m_b}{12} (B^2 + H_{1b}^2) + m_b \left( \frac{H_{1b}}{2} \right)^2 = 334245.67$$

$kg \text{ seg}^2/cm$

Momento de Inercia Total

$$I_{Tx} = I_{e_{x,z}} + I_{bx} = 2373218.757 \quad kg \text{ seg}^2 \text{ cm}$$

$$I_{Tz} = I_{e_{x,z}} + I_{bz} = 14600923.9 \quad kg \text{ seg}^2 \text{ cm}$$

## DISEÑO DEFINITIVO, AMPLITUD DE MOVIMIENTOS.

### Vibración Vertical

Relación de amortiguamiento, D

$$B_z = \frac{(1 - \nu)}{4} \frac{W}{\gamma r_o^3} = 0.457$$

Factor de empotramiento en D

$$\alpha_z = \frac{1 + 1.90(1 - \nu) \frac{h}{r_o}}{\sqrt{\eta_z}} = 1.271393198$$

$$D_z = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}} \alpha_z = 0.7993$$

Fuerzas desbalanceadas de las masas giratorias

Marcador Preset Plus			Cuerpo Impresor			Salida Preset Plus		
Pg =	73499.5	Kg	Pt =	6210	Kg	Ps =	4980	Kg
Prg =	2850	Kg	Prt =	4347	Kg	Prs =	3486	Kg
$\omega_o G =$	2000	rpm	$\omega_o T =$	2000	rpm	$\omega_o S =$	2000	rpm
m =	2.905	kg seg <sup>2</sup> /cm	m =	4.431	kg seg <sup>2</sup> /cm	m =	3.554	kg seg <sup>2</sup> /cm

Excentricidad de la masa desbalanceada

$\alpha = 0.5$  Al instalar el equipo

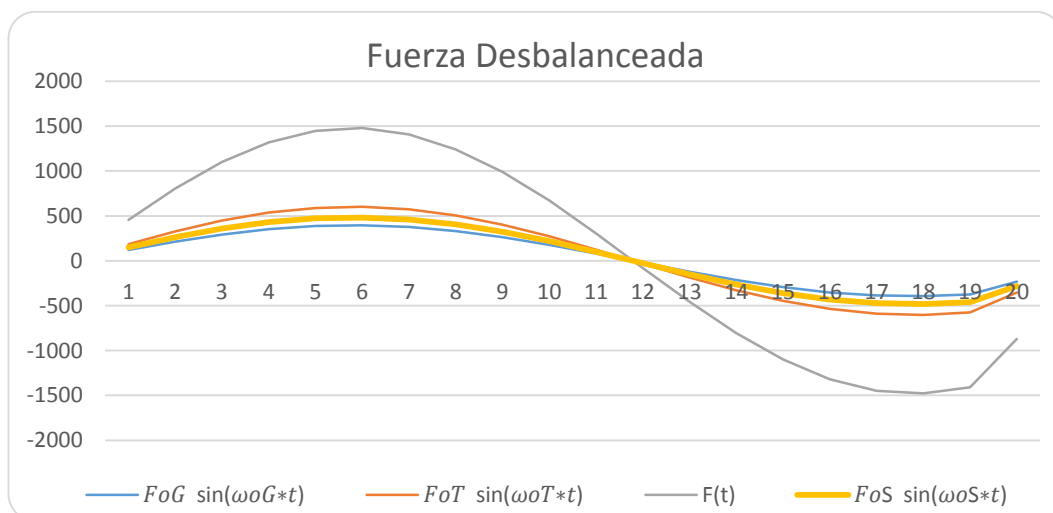
$\alpha = 1$  Después de varios años de instalado el equipo

Marcador Preset Plus		Cuerpo Impresor		Salida Preset Plus	
$e = \alpha \sqrt{\frac{12000}{\omega_{oG}}} (in) = \frac{0.001224745}{0.0031} \text{ cm}$		$e = \alpha \sqrt{\frac{12000}{\omega_{oT}}} (in) = \frac{0.001224745}{0.0031} \text{ cm}$		$e = \alpha \sqrt{\frac{12000}{\omega_{oS}}} (in) = \frac{0.001224745}{0.0031} \text{ cm}$	
Fuerza Centrípeta		Fuerza Centrífuga		Fuerza Centrífuga	
$F_{oG} = \left( \frac{P_{rG}}{g} \right) e (\omega_{oG}^2) = 39.452 \text{ Kg}$		$F_{oT} = \left( \frac{P_{rT}}{g} \right) e (\omega_{oT}^2) = 602.559 \text{ Kg}$		$F_{oS} = \left( \frac{P_{rT}}{g} \right) e (\omega_{oT}^2) = 483.212 \text{ Kg}$	
Periodo		Periodo		Periodo	
$T = 2\pi / \omega_{oG} = 0.03 \text{ Seg}$		$T = 2\pi / \omega_{oT} = 0.03 \text{ Seg}$		$T = 2\pi / \omega_{oS} = 0.03 \text{ Seg}$	

$$F(t) = F_{oG} \sin(\omega_{oG} * t) + F_{oT} \sin(\omega_{oT} * t)$$

t (seg)	$F_{oG} \sin(\omega_{oG} * t)$	$F_{oT} \sin(\omega_{oT} * t)$	$F_{oS} \sin(\omega_o * t)$	F(t)
0	0	0	0	0
0.0015	122.078	186.201	149.321	457.6
0.00275	215.161	328.177	263.176	806.514
0.004	293.581	447.789	359.096	1100.466
0.00525	351.994	536.884	430.545	1319.423
0.0065	386.419	589.392	472.653	1448.464
0.00775	394.511	601.733	482.55	1478.794
0.009	375.717	573.068	459.562	1408.347
0.01025	331.318	505.348	405.256	1241.922
0.0115	264.341	403.191	323.332	990.864
0.01275	179.35	273.556	219.374	672.28
0.014	82.136	125.279	100.465	307.88
0.01525	-20.675	-31.536	-25.289	-77.5
0.0165	-122.078	-186.201	-149.321	-457.6
0.01775	-215.161	-328.177	-263.176	-806.514
0.019	-293.581	-447.789	-359.096	-1100.466
0.02025	-351.994	-536.884	-430.545	-1319.423
0.0215	-386.419	-589.392	-472.653	-1448.464
0.02275	-394.511	-601.733	-482.55	-1478.794
0.024	-375.717	-573.068	-459.562	-1408.347
0.027	-232.206	-354.175	-284.025	-870.406
0.03	0	0	0	0

$F(t)_{max} =$	1478.794	Kg
t =	0.00775	seg



Amplitud de la Vibración Az

$$A_z = \frac{F(t)_{max}}{k_z} \left[ \left( 1 + \left( \frac{f_o}{f_n} \right)^2 \right)^{1/2} \right]$$

0.0021 Mm

Vibración acoplada

Relación de Inercia

$$B_x = \frac{\left( 2D_z - \frac{f_o^2}{f_n^2} - 3v \right)}{32(1-v)} \frac{W}{\gamma r_o^3} = 0.536$$

$$B_{\psi(x)} = \frac{3(1-v)}{8} \frac{I_x}{\rho r_o^5} = 0.529$$

$$B_{\psi(y)} = \frac{3(1-v)}{8} \frac{I_z}{\rho r_o^5} = 0.014$$

Relación de Amortiguamiento		
h =	80	cm

$\eta_x = 1 + 0.55(2-v)(h/r_o) =$	1.237204287
$\alpha_x = \frac{1 + 1.90(2-v)\frac{h}{r_o}}{\sqrt{\eta_x}} =$	1.635744082
$\eta_\psi = 1 + 1.20(1-v)(h/r_o) + 0.20(2-v)(h/r_o)^3 =$	1.218654834

$\alpha_{\psi} = \frac{1+0.70(1-v)\frac{h}{r_o}+0.60(2-v)(h/r_o)^3}{\sqrt{\eta_{\psi}}} =$	1.033550963
--	-------------

$D_x = \frac{0.288}{\sqrt{B_x}} \alpha_x =$	0.643
$D_{\psi} = \frac{0.15\alpha_{\psi}}{(1+n_{\psi}B_{\psi(x)})\sqrt{n_{\psi}B_{\psi(x)}}} =$	0.117
$D_{\psi} = \frac{0.15\alpha_{\psi}}{(1+n_{\psi}B_{\psi(y)})\sqrt{n_{\psi}B_{\psi(y)}}} =$	1.167

Constantes de Amortiguamiento	
$C_{x,z} = 2 * D_x \sqrt{k_{xz} m} =$	20657.638
$C_{\psi,z} = 2 * D_{\psi(x)} \sqrt{k_{\psi(x)} I_x} =$	1074939.124
$C_{\psi,z} = 2 * D_{\psi(z)} \sqrt{k_{\psi(z)} I_z} =$	1748933.172

Rigidez		$k_{\psi}$	
$\beta_{\psi} =$	1.14	h =	80 cm

$$\eta_{\psi} = 1 + 1.20(1 - v)(h/r_o) + 0.20(2 - v)(h/r_o)^3 = 1.37721835$$

$$k_{\psi} = \frac{G}{1 - v} \beta_{\psi} B L^2 \eta_{\psi} \quad 4.69\text{E}+11$$

# Resolución Matricial

$$F_d = 1478.794 \text{ Kg}$$

$$I_x = 334245.67 \text{ kg seg}^2 \text{ cm}$$

$$y = 105.311 \text{ cm}$$

$$H_5 = 43.189 \text{ cm}$$

$$Z_1 = m\omega_o^2 - K_x = 5057910.404$$

$$Z_2 = C_x\omega_o = 4326525.585$$

$$Z_3 = (H_1/2)K_x = 176910118.595$$

$$Z_4 = (H_1/2)C_x\omega_o = 455630735.926$$

$$Z_5 = I_x\omega_o^2 - K_\psi - (H_1/2)^2K_x = -4.73\text{E}+11$$

$$Z_6 = (H_1/2)^2C_x\omega_o + C_\psi\omega_o = 4.80\text{E}+10$$

$Z_1x_1 + Z_2x_2 + z_3a_1 - Z_4a_2 = -F_d$	Ec.1
$Z_2x_1 - Z_1x_2 + Z_4a_1 - Z_3a_2 = 0$	Ec.2
$Z_3x_1 - Z_4x_2 + Z_5a_1 - Z_6a_2 = -F_dH_5$	Ec.3
$Z_4x_1 + Z_3x_2 + Z_6a_1 - Z_5a_2 = 0$	Ec.4

x1 =	-0.00016723
x2 =	-0.000133437
a1 =	1.81461E-07
a2 =	1.92566E-07

$$\begin{aligned} \text{Ec. 1} &= 0 \\ \text{Ec. 2} &= -2.274\text{E}-13 \\ \text{Ec. 4} &= 0.00\text{E}+00 \\ \text{Ec. 5} &= 0.00\text{E}+00 \\ y &= 5.17\text{E}-26 \end{aligned}$$



### Amplitudes del Movimiento

$$A_h = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$$

### Amplitud Horizontal

$$A_h = 0.002139429 \text{ mm}$$

### Angulo de Fase Horizontal

$$\tan \theta_x = x_1/x_2$$

$$\theta_x = 0.897321573$$

### Amplitud de Cabeceo

$$A_c = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

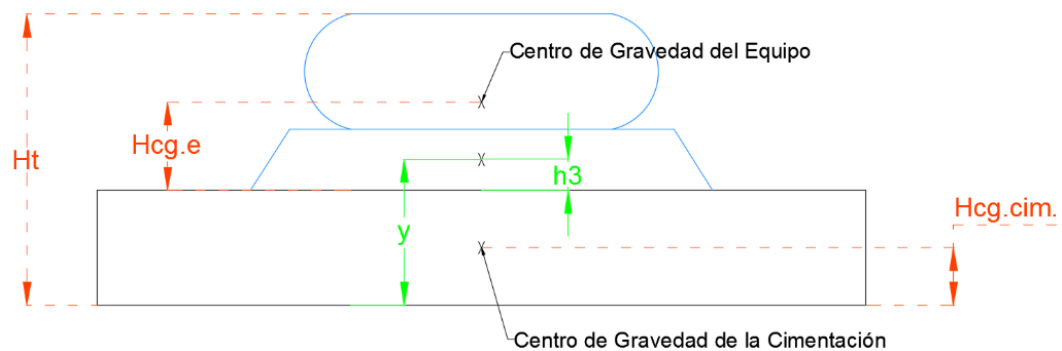
$$A_c = 2.64594\text{E-}06 \text{ mm}$$

### Angulo de Fase de Cabeceo

$$\tan \theta_\psi = a_1/a_2$$

$$\theta_\psi = 0.755714964$$

Amplitud Horizontal Total (Acoplada)		
Hcg. Cim. =	40	cm
Hcg. Equi. =	68.5	cm
m. equipo (me) =	92461	kg seg <sup>2</sup> /cm
m. cimentación =	61.1425	kg seg <sup>2</sup> /cm
y =	105.311	cm
h <sub>3</sub> =	25.311	cm



$$A_x = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + h_3 \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$

$$A_x = 0.0022064 \text{ mm}$$

$$A_x =$$

$$8.6866\text{E-}05 \text{ in}$$

Analizando la amplitud de movimiento obtenida mediante el análisis Pseudo-Dinámico, se determina que el desplazamiento que la cimentación sufre durante la operación del equipo es mínimo, por lo que se confirma las dimensiones de la sustentación utilizadas.

#### **4.12.7** *Modelación de la cimentación mediante el programa SAP2000 v17.0.*

La cimentación de la imprenta en análisis, será modelada mediante el programa computacional estructural SAP 2000, considerando los mismos pasos especificados en el apartado 4.11.7 del presente documento pero con las características propias de la sustentación en estudio, como geometría, resistencia del hormigón, restricciones, cargas, etc.

##### *4.12.7.1 Discretización de la cimentación.*

Se divide la cimentación con el fin de obtener varios elementos más pequeños y realizar un análisis más preciso en rectángulos de 20 x 20 cm de la siguiente manera:

$$\frac{1562 \text{ cm}}{78} = 20 \text{ cm} \qquad \frac{200 \text{ cm}}{10} = 20 \text{ cm}$$

##### *4.12.7.2 Definición de los esfuerzos admisibles del suelo.*

Aplicando la teoría determinada por Bowless se determina el esfuerzo a compresión admisible del suelo, y se lo ingresa en el modelo a manera de resortes que soportan únicamente compresión:

$$Kb = 40 * Fs * \sigma_{adm}$$

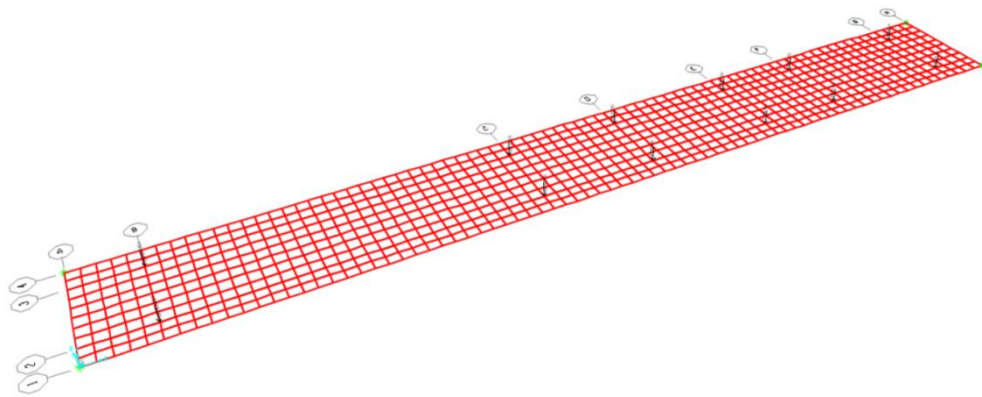
Considerando un factor de seguridad de 3 y el esfuerzo admisible del suelo de  $20 \text{ t/m}^2$  se determina:

$$Kb = 40 * 3 * 20 \text{ t/m}^2$$

$$Kb = 2400 \text{ t/m}^3$$

**IMAGEN 0.59 – Definición de los esfuerzos admisibles del suelo. (SAP 2000)**

El modelo queda determinado de la siguiente manera:



**IMAGEN 0.60 - Modelo Imprenta. (SAP 2000)**

#### *4.12.7.3 Definición de funciones para estados dinámicos de carga.*

La cimentación será analizada bajo dos sollicitaciones dinámicas, simulando los efectos del funcionamiento del equipo en bajas y altas velocidades de operación, es decir, 3960 y 11600 rpm respectivamente; utilizando las funciones del programa SAP2000 Time History y Steady State.

- **Funciones para Time History**

Se definen funciones sinusoidales tanto para altas y bajas velocidades de operación, considerando un periodo específico para cada caso, dividido en 24 etapas para realizar su análisis.

La herramienta Time History permite realizar un análisis en función del tiempo mediante valores de aceleración del suelo, o de igual manera multiplicadores de los efectos de los patrones de las fuerzas sobre la cimentación.

TIME HISTORY			
	RPM	Hz	T(seg)
Baja Presión	2200	36.66666667	0.02727273
Alta Presión	5500	91.67	0.01090869

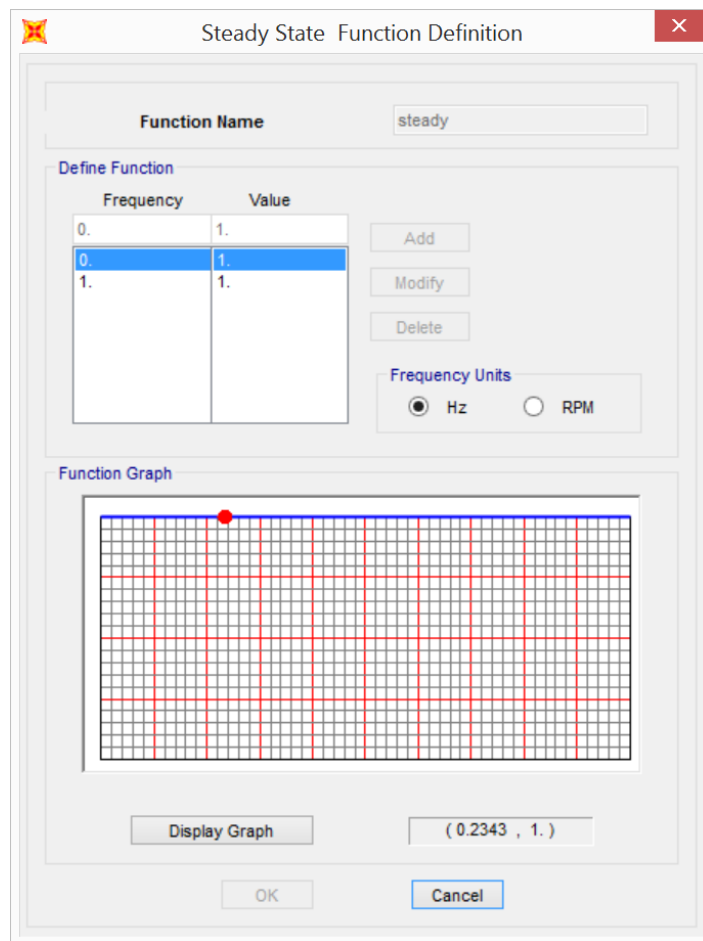
BAJA PRESIÓN	
Tiempo	Valor
0	0.0000
0.00113636	0.2588
0.00227273	0.5000
0.00340909	0.7071
0.00454545	0.8660
0.00568182	0.9659
0.00681818	1.0000
0.00795455	0.9659
0.00909091	0.8660
0.01022727	0.7071
0.01136364	0.5000
0.0125	0.2588
0.01363636	0.0000
0.01477273	-0.2588
0.01590909	-0.5000
0.01704545	-0.7071
0.01818182	-0.8660
0.01931818	-0.9659
0.02045455	-1.0000
0.02159091	-0.9659
0.02272727	-0.8660
0.02386364	-0.7071
0.025	-0.5000
0.02613636	-0.2588
0.02727273	0.0000

ALTA PRESIÓN	
Tiempo	Valor
0	0.0000
0.00045453	0.2588
0.00090906	0.5000
0.00136359	0.7071
0.00181812	0.8660
0.00227264	0.9659
0.00272717	1.0000
0.0031817	0.9659
0.00363623	0.8661
0.00409076	0.7072
0.00454529	0.5001
0.00499982	0.2589
0.00545435	0.0001
0.00590888	-0.2587
0.0063634	-0.4999
0.00681793	-0.7070
0.00727246	-0.8659
0.00772699	-0.9659
0.00818152	-1.0000
0.00863605	-0.9660
0.00909058	-0.8661
0.00954511	-0.7072
0.00999964	-0.5002
0.01045417	-0.2590
0.01090869	-0.0002

- **Funciones para Steady State**

Se definen funciones lineales tanto para altas y bajas velocidades de operación, considerando un periodo específico para cada caso, dividido en 24 etapas para realizar su análisis. Para el modelo se utilizarán los datos obtenidos de frecuencia (rpm) y periodo (seg).

La herramienta Steady State permite realizar un análisis en función de una lista de valores obtenidos a partir de la frecuencia de excitación, mediante valores de aceleración del suelo, o de igual manera multiplicadores de los efectos de los patrones de las fuerzas sobre la cimentación.



**IMAGEN 0.61 - Función de Steady State para Baja y Alta Presión. (SAP 2000)**

#### 4.12.7.4 Definición del espectro de respuesta sísmico.

Se define el espectro de respuesta mediante la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

**Response Spectrum Function Definition**

Function Name:  Function Damping Ratio:

Define Function

Period	Acceleration
0.	0.48
0	0.48
0.04	0.66
0.07	0.84
0.14	1.19
0.22	1.19
0.3	1.19
0.38	1.19
0.46	1.19

Add Modify Delete

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

La fuerza basal calculada en la sección 4.12.3.1 se ingresa al análisis mediante fuerzas en cada sentido con el coeficiente de W.

**User Defined Seismic Load Pattern**

Load Direction and Diaphragm Eccentricity

☒ Global X Direction  
☐ Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

Other Factors

Base Shear Coefficient, C

Building Height exp., K

Lateral Load Elevation Range

☒ Program Calculated  
☐ User Specified

Max Z   
Min Z

OK Cancel

#### 4.12.8 Análisis de Resultados.

##### 4.12.8.1 Análisis Modal

Al correr el análisis modal se utilizó 40 pasos de cálculo para obtener la mayor cantidad de participación de la masa, se identifica que bastaba con analizar 20 pasos puesto que en el cálculo número 21 se determina la mayor participación de la masa.

OutputCase	Step Type	Step Num	Period	Frequency	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.100682	9.932274455	0	0
MODAL	Mode	2	0.09426	10.60899218	0	0
MODAL	Mode	3	0.092258	10.83918532	0	0
MODAL	Mode	4	0.073303	13.64198462	0	0
MODAL	Mode	5	0.070692	14.14582723	1.36E-08	0.676
MODAL	Mode	6	0.043373	23.05584204	1.36E-08	0.676
MODAL	Mode	7	0.031627	31.61865997	1.36E-08	0.676
MODAL	Mode	8	0.026594	37.60242869	0.0005079	0.677
MODAL	Mode	9	0.023252	43.00748902	0.0005079	0.677
MODAL	Mode	10	0.021547	46.41052652	0.952	0.677
MODAL	Mode	11	0.016105	62.09390637	0.952	0.677
MODAL	Mode	12	0.015365	65.0817911	0.952	0.912
MODAL	Mode	13	0.01501	66.62105586	0.952	0.912
MODAL	Mode	14	0.011588	86.29831606	0.952	0.914
MODAL	Mode	15	0.011207	89.23117153	0.952	0.914
MODAL	Mode	16	0.011041	90.57100007	0.965	0.914
MODAL	Mode	17	0.010853	92.13933346	0.965	0.914
MODAL	Mode	18	0.008812	113.4762111	0.965	0.974
MODAL	Mode	19	0.008437	118.526225	0.965	0.974
MODAL	Mode	20	0.007443	134.3526416	0.988	0.975
MODAL	Mode	21	0.007349	136.0719484	0.99	0.985
MODAL	Mode	22	0.007295	137.0730839	0.99	0.985
MODAL	Mode	23	0.006813	146.7869684	0.99	0.985
MODAL	Mode	24	0.006545	152.7931818	0.99	0.994
MODAL	Mode	25	0.00595	168.0691765	0.99	0.994
MODAL	Mode	26	0.005623	177.8481437	0.991	0.994
MODAL	Mode	27	0.005595	178.7422632	0.991	0.994
MODAL	Mode	28	0.00546	183.1543236	0.991	0.994



MODAL	Mode	29	0.005325	187.7923109	0.995	0.994
MODAL	Mode	30	0.004915	203.4433357	0.996	0.995
MODAL	Mode	31	0.004694	213.0259236	0.996	0.995
MODAL	Mode	32	0.004657	214.7438187	0.996	0.995
MODAL	Mode	33	0.004494	222.528297	0.997	0.995
MODAL	Mode	34	0.004424	226.0241446	0.998	0.995
MODAL	Mode	35	0.004396	227.4697473	0.998	0.995
MODAL	Mode	36	0.004039	247.5683698	0.998	0.995
MODAL	Mode	37	0.004026	248.3599545	0.998	0.995
MODAL	Mode	38	0.00393	254.4701312	0.998	0.995
MODAL	Mode	39	0.003926	254.701764	0.998	0.995
MODAL	Mode	40	0.003791	263.7864211	0.998	0.995

***TABLA 0.43 - Resultados del análisis Modal. (Luca Limaico)***

#### *4.12.8.2 Análisis Dinámico*

Para determinar el comportamiento ante esfuerzos dinámicos de la cimentación se analizarán los datos de velocidades obtenidos mediante las funciones de Time History y Steady State tanto para alta como para baja presión. La velocidad máxima para la sustentación está dada por la literatura y se encuentra limitada en 0.1 mm/seg; la velocidad se calcula a partir de los datos proporcionados por el programa SAP 2000

mediante la expresión,  $V = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ .

- Velocidad determinada a partir de la función Time History de Alta Presión.

**TABLA 0.44 Velocidades Máximas con Función Time History de Alta Presión. (Luca Limaico)**

TABLE: Joint Velocities - Absolute								
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	Velocidad	Vel. Maxima
Text	Text	Text	Text	mm/sec	mm/sec	mm/sec	(mm/seg)	(mm/seg)
4	TimeH-AP	LinModHist	Min	0	0	-28.74	28.74	28.74
35	TimeH-AP	LinModHist	Max	3.245E-07	0.000001232	28.73	28.73	
35	TimeH-AP	LinModHist	Min	-3.245E-07	-0.000001235	-28.73	28.73	
4	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	28.73	28.73	
1	TimeH-AP	LinModHist	Min	-8.661E-07	-0.000001737	-28.72	28.72	
1	TimeH-AP	LinModHist	Max	8.655E-07	0.000001733	28.71	28.71	
373	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000001434	-0.000002043	-28.68	28.68	
373	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000001433	0.000002039	28.67	28.67	
371	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000001969	0.000002223	28.61	28.61	
371	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000001971	-0.000002235	-28.61	28.61	
369	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000002378	-0.000002336	-28.53	28.53	
369	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000002377	0.000002331	28.53	28.53	
367	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000002631	0.000002294	28.44	28.44	
367	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000002632	-0.000002298	-28.44	28.44	
365	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000002734	-0.000002131	-28.34	28.34	
365	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000002734	0.000002128	28.33	28.33	
17	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000002601	-0.000001659	-28.23	28.23	
17	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000002602	0.000001657	28.22	28.22	
831	TimeH-AP	LinModHist	Max	0.000002209	0.000001038	28.13	28.13	
831	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0.000002207	-0.000001038	-28.13	28.13	

- Velocidad determinada a partir de la función Time History de Baja Presión.

**TABLA 0.45 Velocidades Máximas con Función Time History de Baja Presión. (Luca Limaico)**

TABLE: Joint Velocities – Absolute							Velocidad (mm/seg)	Vel. Maxima (mm/seg)
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm/sec	mm/sec	mm/sec		
284	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.403E-07	0.000001488	42.98	42.98	42.98
287	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.417E-07	0.000001503	42.93	42.93	
284	TimeH-BP	LinModHist	Min	-9.438E-07	-0.000001482	-42.91	42.91	
287	TimeH-BP	LinModHist	Min	-9.471E-07	-0.000001498	-42.84	42.84	
283	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.106E-07	0.00000148	42.75	42.75	
281	TimeH-BP	LinModHist	Max	8.772E-07	0.000001462	42.73	42.73	
286	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.708E-07	0.000001521	42.72	42.72	
944	TimeH-BP	LinModHist	Max	2.171E-07	0.000001315	42.68	42.68	
283	TimeH-BP	LinModHist	Min	-9.144E-07	-0.000001475	-42.67	42.67	
281	TimeH-BP	LinModHist	Min	-8.785E-07	-0.000001457	-42.66	42.66	
286	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0.000000976	-0.000001516	-42.64	42.64	
944	TimeH-BP	LinModHist	Min	-2.148E-07	-0.00000131	-42.6	42.6	
946	TimeH-BP	LinModHist	Max	1.344E-07	0.000001295	42.57	42.57	
282	TimeH-BP	LinModHist	Max	0.00000085	0.000001468	42.56	42.56	
12	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.137E-07	0.000001489	42.53	42.53	
285	TimeH-BP	LinModHist	Max	9.341E-07	0.000001487	42.53	42.53	
945	TimeH-BP	LinModHist	Max	0.000000242	0.000001328	42.52	42.52	
280	TimeH-BP	LinModHist	Max	8.472E-07	0.000001463	42.5	42.5	
942	TimeH-BP	LinModHist	Max	4.695E-07	0.000001327	42.49	42.49	
282	TimeH-BP	LinModHist	Min	-8.535E-07	-0.000001463	-42.48	42.48	

La expresión  $D = \frac{0.1 \text{ mm/s}}{w}$  expresa el valor limitante de los desplazamientos de la sustentación, dicho valor se considera como un desplazamiento admisible y es de 0.05 mm. Los desplazamientos se controlan con las funciones Time History y Steady State tanto en alta como en baja presión, para obtener un desplazamiento que exprese todas las componentes del mismo se utilizará la expresión  $D = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ ; analizando los datos se obtiene:

- Desplazamientos con función Steady State de Alta Presión.

TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
88	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005941	0.005941	0.005941
88	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005941	0.005941	
865	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005687	0.005687	
865	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005687	0.005687	
85	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.00567	0.00567	
85	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.00567	0.00567	
91	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005387	0.005387	
91	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005387	0.005387	
863	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005336	0.005336	
863	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005336	0.005336	
867	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005261	0.005261	
867	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005261	0.005261	
87	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004664	0.004664	
87	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004664	0.004664	
82	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004662	0.004662	
82	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004662	0.004662	
442	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	0.004642	0.004642	
442	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	0.004642	0.004642	
866	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004623	0.004623	
866	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004623	0.004623	

**TABLA 0.46 Desplazamientos máximos con función Steady State de Alta Presión. (Luca Limaico)**

- Desplazamientos con función Steady State de Baja Presión.

TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
88	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005941	0.005941	0.005941
88	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005941	0.005941	
865	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005687	0.005687	
865	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005687	0.005687	
85	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.00567	0.00567	
85	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.00567	0.00567	
91	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005387	0.005387	
91	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005387	0.005387	
863	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005336	0.005336	
863	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005336	0.005336	
867	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.005261	0.005261	
867	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.005261	0.005261	
87	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004664	0.004664	
87	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004664	0.004664	
82	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004662	0.004662	
82	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004662	0.004662	
442	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	0.004642	0.004642	
442	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	0.004642	0.004642	
866	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Max	0	0	-0.004623	0.004623	
866	SteadyS-AP	LinSteady	Imag Min	0	0	-0.004623	0.004623	

**TABLA 0.47 Desplazamientos máximos con función Steady State de Baja Presión. (Luca Limaico)**

- Desplazamientos con función Time History de Alta Presión.

TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
4	TimeH-AP	LinModHist	Min	0	0	-0.049899	0.049899	0.049899
35	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049896	0.049896	
4	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049878	0.049878	
35	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049875	0.049875	
1	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049866	0.049866	
1	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049845	0.049845	
373	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049796	0.049796	

373	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049775	0.049775
371	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049689	0.049689
371	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049668	0.049668
369	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.04955	0.04955
369	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049529	0.049529
367	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049387	0.049387
367	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049366	0.049366
365	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049209	0.049209
365	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.049187	0.049187
17	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.049019	0.049019
17	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.048998	0.048998
831	TimeH-AP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.048855	0.048855
831	TimeH-AP	LinModHist	Max	0	0	0.048834	0.048834

**TABLA 0.48 Desplazamientos máximos con función Time History de Alta Presión. (Luca Limaico)**

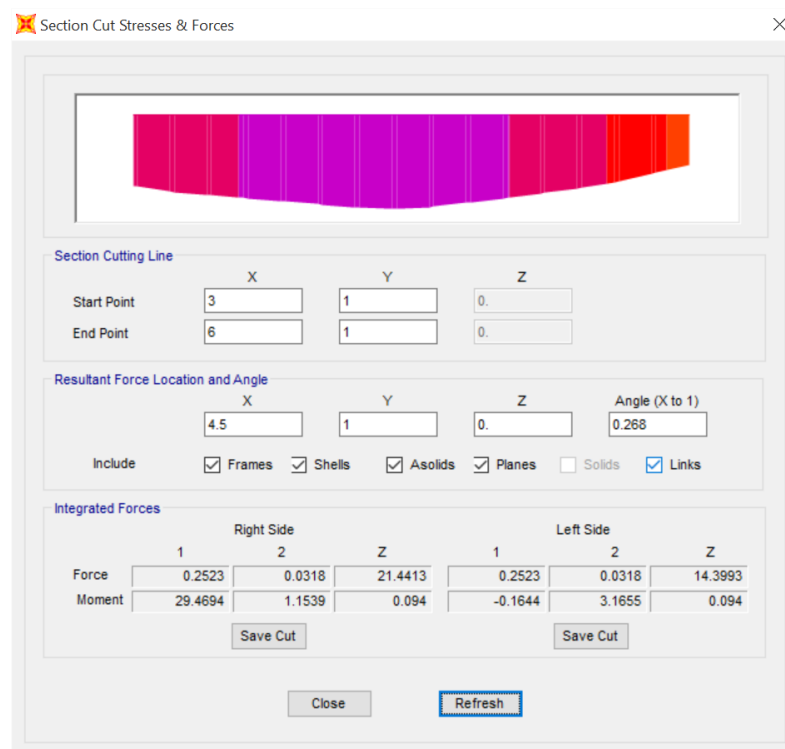
- Desplazamientos con función Time History de Baja Presión.

TABLE: Joint Displacements							Desplazamientos	Desp. Max.
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3		
Text	Text	Text	Text	mm	mm	mm	mm	mm
284	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.186324	0.186324	0.186324
284	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.186296	0.186296	
287	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.186071	0.186071	
287	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.186037	0.186037	
283	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.185311	0.185311	
283	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.185283	0.185283	
281	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.185229	0.185229	
281	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.185208	0.185208	
286	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.185183	0.185183	
286	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.185149	0.185149	
944	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.185005	0.185005	
944	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.184977	0.184977	
946	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.184511	0.184511	
946	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.184477	0.184477	
282	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.184469	0.184469	
282	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.184441	0.184441	
285	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.184358	0.184358	
12	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.184335	0.184335	
285	TimeH-BP	LinModHist	Max	0	0	0.184324	0.184324	
945	TimeH-BP	LinModHist	Min	-0	-0	-0.184303	0.184303	

**TABLA 0.49 Desplazamientos máximos con función Time History de Baja Presión. (Luca Limaico)**

#### 4.12.8.3 Análisis Estático

El análisis estático se lleva a cabo mediante el estudio de los momentos en la zona central de la cimentación en ambas direcciones (eje x y eje y), dichas magnitudes son obtenidas mediante la combinación de carga envolvente, que agrupa todas las combinaciones de diseño aplicadas sobre el modelo.



**IMAGEN 0.60 Diagrama de momentos negativo, Eje Longitudinal. (SAP 2000)**

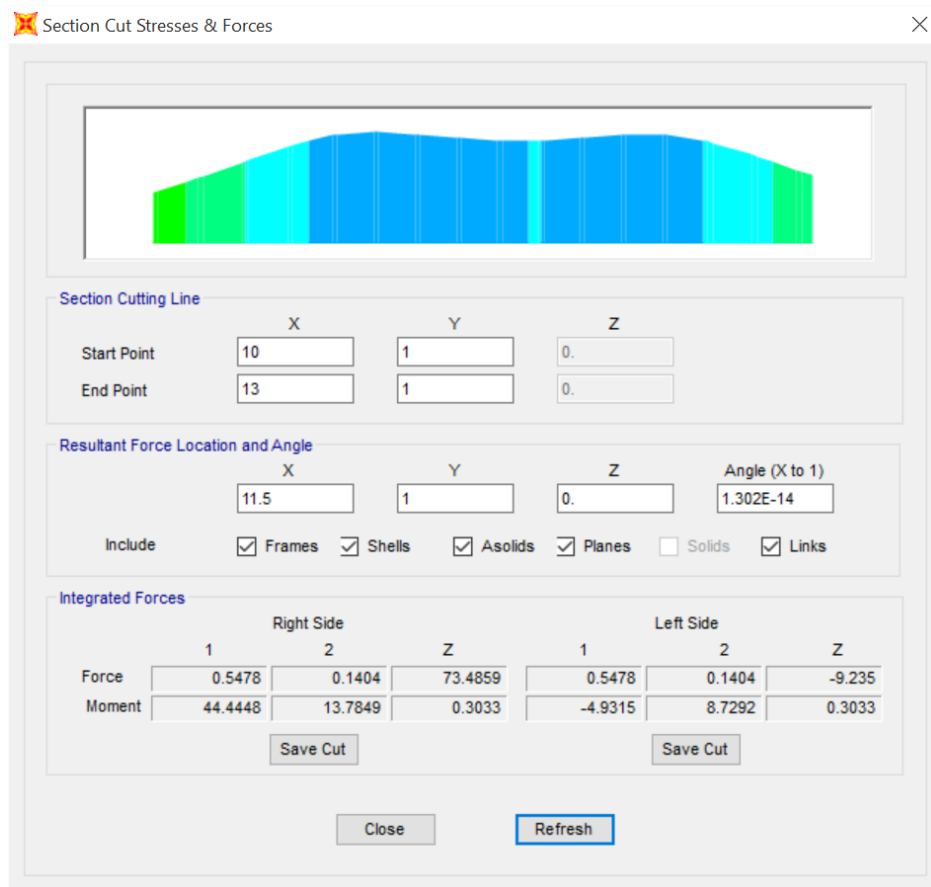


IMAGEN 0.61 Diagrama de momentos positivo, Eje Longitudinal. (SAP 2000)

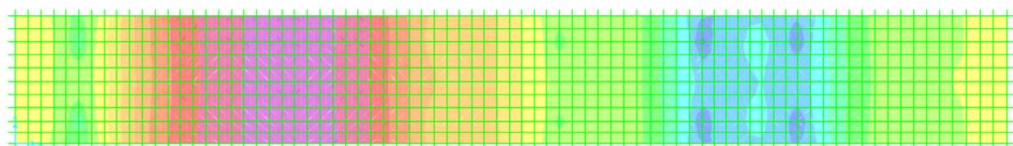
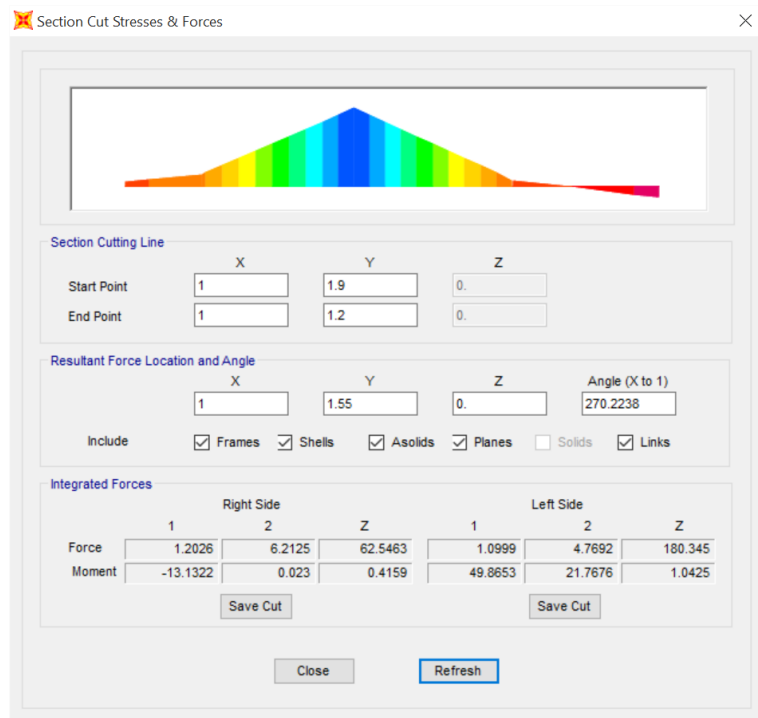
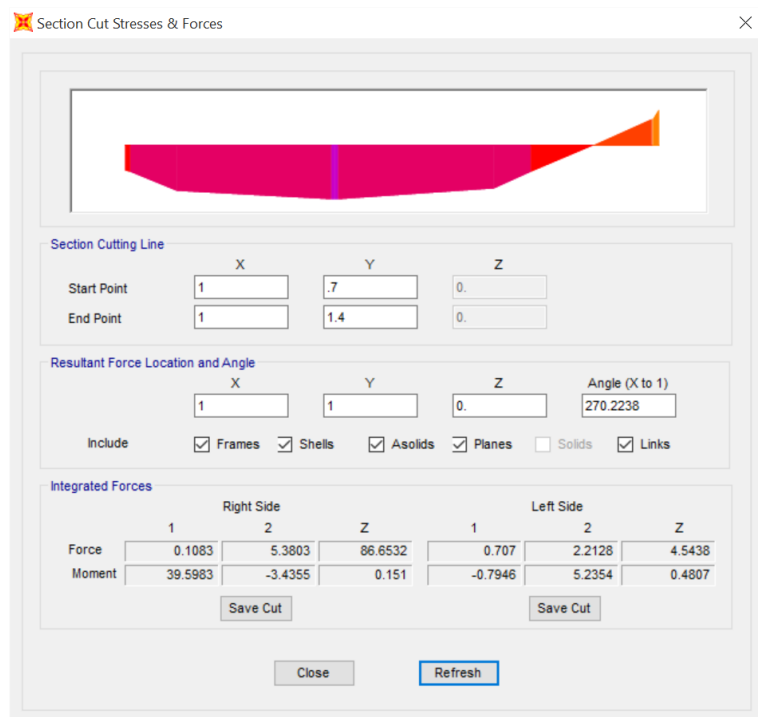


IMAGEN 0.62 Esquema general de momentos sentido Longitudinal, Imprenta. (SAP 2000)

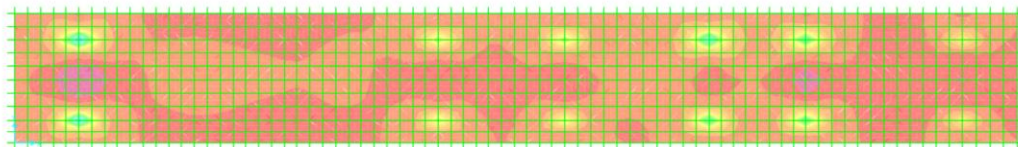




**IMAGEN 0.63** Diagrama de momentos positivo, Eje Transversal. (SAP 2000)



**IMAGEN 0.64** Diagrama de momentos negativo, Eje Transversal. (SAP 2000)



**IMAGEN 0.45** Esquema general de momentos sentido Transversal, Imprenta. (SAP 2000)

Los momentos obtenidos son determinados para un metro lineal, y sus magnitudes se encuentran resumidas en la siguiente tabla:

Momentos actuantes sobre la cimentación		
Sentido	Magnitud	
	Positivo T-m	Negativo T-m
M11 (Longitudinal)	44.44	29.47
M12 (Transversal)	44.86	39.59

Los desplazamientos en los nudos en los que se encuentran aplicadas las fuerzas estáticas del equipo se analizan únicamente en el sentido del eje z, puesto que los desplazamientos laterales son analizados mediante los esfuerzos dinámicos. Se analizan los desplazamientos con el tipo de carga envolvente de servicio puesto que engloba todos los posibles efectos reales actuantes sobre la cimentación. Los desplazamientos especificados son los siguientes:

Coordenadas Plano	Coordenadas SAP2000	Nudo	Caso de Carga	Tipo de Carga	Tipo	Desplazamiento Relativo (mm)
A1	3B	2	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.004581
A2	3C	5	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.011805
A3	3D	7	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.003503
A4	3E	9	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.003919
A5	3F	11	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.000931
A6	3G	13	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.000763
Desplazamiento Maximo						0.011805
B1	2B	18	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.004584

B2	2C	19	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.011923
B3	2D	23	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.003493
B4	2E	24	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.003953
B5	2F	27	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.000969
B6	2G	29	Envolvente(Servc)	Combination	Max	0.000816
Desplazamiento Máximo						0.011923

**TABLA 0.50 Desplazamientos Verticales, Imprenta. (Luca Limaico)**

#### 4.12.9 Diseño Estructural.

Los aceros requeridos son determinados mediante el método de diseño por ultima resistencia, aplicando las formulas descritas en cada paso.

##### 4.12.9.1 Determinación de la armadura superior.

Armadura Superior	
Mu =	49.86 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	320 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9 (flexión)
b =	100 Cm
d =	100 Cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2Mu}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 4986000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 13.33 \text{ cm}^2/\text{m}$$

#### 4.12.9.2 Determinación de la armadura inferior.

Armadura Superior	
Mu =	39.59 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	320 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9 (flexión)
b =	100 cm
d =	100 cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2Mu}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 3959000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 10.56 \text{ cm}^2/\text{m}$$

#### 4.12.9.3 Momento Resistente por cuantía mínima.

Cuantía Mínima	
Mu =	85.5 Tm
Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	320 Kg/cm <sup>2</sup>
φ =	0.9
b =	100 cm
d =	115 cm

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * b * d}{F_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2Mu}{0.85 * \phi * f'c * b * d^2}} \right]$$

$$A_s = \frac{0.85 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 8550000 \text{ Kg/cm}}{0.85 * 0.9 * 320 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm} * (100 \text{ cm})^2}} \right]$$

$$A_s = 23.03 \text{ cm}^2/m$$

**Mínima Cuantía:**

$$\rho_{min} = 0.0018 = \rho$$

$$A_{min} = 18 \text{ cm}^2/m$$

**Máxima Cuantía:**

$$\rho_{max} = 0.5\rho_{balanceado}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'_c}{F_y} * \frac{0.003}{\frac{F_y}{E_s} + 0.003}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.85 * 0.85 * \frac{320 \text{ Kg/cm}^2}{4200 \text{ Kg/cm}^2} * \frac{0.003}{\frac{4200 \text{ Kg/cm}^2}{2100000 \text{ Kg/cm}^2} + 0.003}$$

$$\rho_{balanceado} = 0.03302$$

$$\rho_{max} = 0.01651$$

Si se cumple la desigualdad  $\rho < \rho_{max}$  , entonces el diseño de los aceros es aceptable.

$$0.0018 < 0.01651 \therefore \text{Diseño Correcto}$$

#### 4.12.9.4 Aceros de refuerzo por flexión.

Por lo tanto se utilizan los aceros que cumplan con los requerimientos de aceros mínimos, considerando que son los requerimientos estructurales más altos obtenidos:

- 1  $\phi$  22 mm @ 16 cm, en la parte superior e inferior de la cimentación en sentido longitudinal.
- 1  $\phi$  22 mm @ 16 cm, en la parte superior e inferior de la cimentación en sentido transversal.

#### 4.12.9.5 Diseño por Corte

Fy =	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
f'c =	320 Kg/cm <sup>2</sup>
$\phi$ =	0.85
Vu =	18.84 Ton (Envolvente de diseño)

$$v_c = 0.53\sqrt{f'c}$$

$$v_c = 0.53\sqrt{280 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$v_c = 9.48 \text{ Kg/cm}^2$$

$$V_c = v_c * b * d$$

$$V_c = 8.87 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} * 100 \text{ cm} * 100 \text{ cm}$$

$$V_c = 94.8 \text{ Ton}$$

$$V_s = \frac{V_u - \phi * V_c}{\phi}$$

$$V_s = \frac{18.84 \text{ Ton} - 0.85 * 94.8 \text{ on}}{0.85}$$

$$V_s = 72.63 \text{ Ton}$$

$$A_v = \frac{V_s * S}{F_y * d}$$

$$A_v = \frac{72.63 \text{ Ton} * 1000 * 67.5 \text{ cm}}{4200 \text{ Kg/cm}^2 * 100 \text{ cm}}$$

$$A_v = 11.67 \text{ cm}^2$$

Sin embargo de haber obtenido un área de aceros por corte de 11.67 cm<sup>2</sup>, se colocarán estribos  $\phi$  12 mm por cumplir las recomendaciones existentes para de este tipo de estructuras en la literatura especializada. Por lo tanto:

- 1E  $\phi$  12 mm @ 15 cm, en los ejes de la cimentación en sentido longitudinal.
- 1E  $\phi$  12 mm @ 15 cm, en los ejes de la cimentación en sentido transversal.

#### 4.12.9.6 Control de Agrietamiento.

Se requiere determinar un área mínima de acero para evitar el agrietamiento del hormigón, para la cual se utiliza la expresión:

$$\sigma = \frac{M_{ag} * c}{I}$$

Donde,

$\sigma = f_t = \text{Fuerza resistente del hormigón a tracción.}$

$c = \text{Distancia de la fibra mas externa al eje neutro.}$

$$f_t = 13\%f'c = 320 \text{ Kg/cm}^2 = 41.6 \text{ Kg/cm}^2$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{100 \text{ cm} * (80 \text{ cm})^3}{12} = 4266666.67 \text{ cm}^4$$

$$M_{ag} = \frac{F_t * I}{c} = \frac{41.6 \text{ Kg/cm}^2 * 4266666.67 \text{ cm}^4}{40 \text{ cm}} = 44.37 \text{ Tm}$$

Ya que el momento por agrietamiento ( $M_{ag}$ ) es menor al momento resistente, se determina que la armadura propuesta anteriormente, es suficiente para soportar los efectos del agrietamiento sobre el hormigón.



## CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Al realizar el análisis de los datos obtenidos en el presente documento se pueden concluir los siguientes aspectos:

1. El análisis estático no es un análisis suficiente al momento de proyectar una cimentación que soporta equipo dinámico, puesto que no considera todos los posibles esfuerzos a los que estará sometida.
2. Se debe realizar un análisis dinámico a una cimentación que soportara equipo industrial, ya que los esfuerzos dinámicos que dicho equipo genera son los más críticos al momento de evaluar la serviciabilidad y la eficacia de la sustentación.
3. Existen varios tipos de análisis Pseudo-dinámicos que utilizan diferentes conceptos, pero es importante seleccionar el método de análisis a utilizarse en función del tipo de maquinaria que se debe cimentar, las condiciones generales del suelo y la zona geográfica donde debe realizarse el proyecto y los parámetros que se tengan para comparar la veracidad de los datos obtenidos.
4. El método de análisis dinámico que se utilizó es el de masa resorte equivalente para obtener mejores posibilidades de utilizar al máximo las características del programa en cuanto a buscar una simulación más precisa de las características propias del suelo y el funcionamiento del equipo y lograr comparar los resultados del análisis computacional con los del análisis Pseudo-Dinámico.
5. Se utilizaron los parámetros propuestos por *Richart & Whitman*, *Comparison of Footing Vibration, Test with Theory* ( $\beta, \eta, \alpha$ ); puesto que son factores

probados que consideran la forma de la cimentación y el modo de vibración de las mismas en el cálculo de las constantes de resorte, relación de inercias, relación de amortiguamiento y factor de empotramiento en el análisis Pseudo-Dinámico.

6. Se proyectó la utilización de una cimentación del tipo bloque por la recomendación de los fabricantes, por la inexistencia de esfuerzos elevados de torsión o de viento y al analizar las buenas condiciones mecánicas del suelo.

#### *Turbogenerador GE LM-6000*

- *Análisis Pseudo-Dinámico*
7. El análisis Pseudo-Dinámico de la cimentación del turbogenerador GE LM-6000 arroja que la amplitud de la vibración se establece en 0.0044846 mm, muy alejado del límite permisible que se establece en 0.05 mm.
  8. La frecuencia natural obtenida mediante este análisis se aleja de la frecuencia del movimiento que la sustentación describe, por lo tanto sus periodos no son coincidentes, evitando así el fenómeno de resonancia.

<b>Tipo de Frecuencia</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Periodo (sec)</b>
<i>Frecuencias Naturales</i>		
Frecuencia (Vertical)	6.531024752	0.153115328
Frecuencia (Horizontal)	6.949481849	0.14389562
<i>Frecuencias de Operación</i>		
Frecuencia en Baja Presión	66	0.015151515
Frecuencia en Alta Presión	193.33	0.005172503

- *Análisis Computacional.*

9. Se concluye mediante el análisis modal que la configuración geométrica de la cimentación es la adecuada puesto que los resultados del periodo de vibración de la cimentación se alejan considerablemente incluso en los modos en los que la participación de la masa es casi del 100%. (Tabla 4.24)
10. La velocidad que alcanza el movimiento de la cimentación no sobrepasa los límites admisibles propuestos (0.1 mm/seg), por lo que se concluye que la sustentación tiene las características geométricas y físicas adecuadas.

Tipo de Función Time History	Vel. Máxima (mm/seg)
Alta Presión	1.60611E-09
Baja Presión	5.19618E-09

11. Se determina que la masa y la geometría de la cimentación son las adecuadas para soportar los esfuerzos dinámicos porque los desplazamientos máximos obtenidos por las funciones que simulan dichos efectos, no sobrepasan el límite especificado de 0.05 mm.

Tipo de Función	Desplazamientos Max. mm
Steady State de Alta Presión	0.000002907
Steady State de Baja Presión	0.000025
Time History de Alta Presión	1.32E-12
Time History de Baja Presión	1.38E-11

*Imprenta SX103-8P*

- *Análisis Pseudo-Dinámico*

12. El desplazamiento determinado mediante el análisis Pseudo-Dinámico de la sustentación de la imprenta SX103-8P es de 0.0022064 mm que difiere del límite establecido en 0.05 mm en un gran porcentaje, lo que asegura la configuración de la cimentación de este equipo.
13. Los periodos de las vibraciones tanto verticales como horizontales obtenidos en este análisis aseguran la inexistencia del fenómeno de resonancia pues difieren considerablemente de los periodos naturales de vibración.

<b>Tipo de Frecuencia</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Periodo (sec)</b>
<i>Frecuencias Naturales</i>		
Frecuencia (Vertical)	13.05695485	0.076587536
Frecuencia (Horizontal)	16.64406414	0.06008148
<i>Frecuencias de Operación</i>		
Frecuencia en Baja Presion	31.66	0.031585597
Frecuencia en Alta Presion	96.67	0.010344471

- *Análisis Computacional.*

14. El análisis modal nos permite concluir que el planteamiento de la cimentación es el adecuado ya que los periodos de vibración mostrados en la tabla 4.XX son bastante inferiores a los periodos de operación del equipo, incluso en los periodos en los que la participación de la masa es casi total.
15. El límite de la velocidad se especifica en 0.1 mm/seg, pero los datos de velocidad obtenidos nos muestran resultantes de velocidad mucho mayores a este límite:

<b>Tipo de Función Time History</b>	<b>Vel. Máxima (mm/seg)</b>
Alta Presión	28.74

Al analizar los datos con mayor detenimiento (Tabla 4.XX), se observa que las componentes de velocidad de los ejes  $x$  y  $y$  son bastante pequeñas y que la velocidad que genera un incremento en la resultante es la que se expresa en el eje  $z$ . Dichas velocidades si bien es cierto es elevada con respecto al límite admisible no representan un limitante en el diseño puesto que se debe considerar que a lo largo de las superficies de contacto entre la cimentación y el suelo en el eje  $z$  existe rozamiento, que no es considerado en el modelamiento de la cimentación y además se debe tomar en cuenta los otros parámetros de control.

16. Analizando las velocidades obtenidas mediante las funciones que simulan los efectos dinámicos sobre la cimentación se encuentra que el desplazamiento producto de la función Time History de Baja Presión resulta más alto que el máximo permisible.

Tipo de Función	Desp. Max. mm
Steady State de Alta Presion	0.005941
Steady State de Baja Presion	0.005941
Time History de Alta Presión	0.049899
Time History de Baja Presión	0.186324

Por lo que podría ser recomendable aumentar la sección de la cimentación en el sentido del eje  $z$  para evitar este desplazamiento excesivo, pese a que este no represente un problema grave por su magnitud.

## **ANEXOS**



## ANEXO 1 FOTOGRAFICO



FOTOGRAFÍA 1 - TURBOGENERADOR



FOTOGRAFÍA 2 - TURBOGENERADOR





FOTOGRAFÍA 3 - TURBOGENERADOR



FOTOGRAFÍA 4 - TURBOGENERADOR





FOTOGRAFÍA 5 - TURBOGENERADOR



FOTOGRAFÍA 6 - TURBOGENERADOR





FOTOGRAFÍA 7 - TURBOGENERADOR



FOTOGRAFÍA 8 - TURBOGENERADOR



FOTOGRAFÍA 9 – TURBOGENERADOR





FOTOGRAFÍA 10 – IMPRENTA.

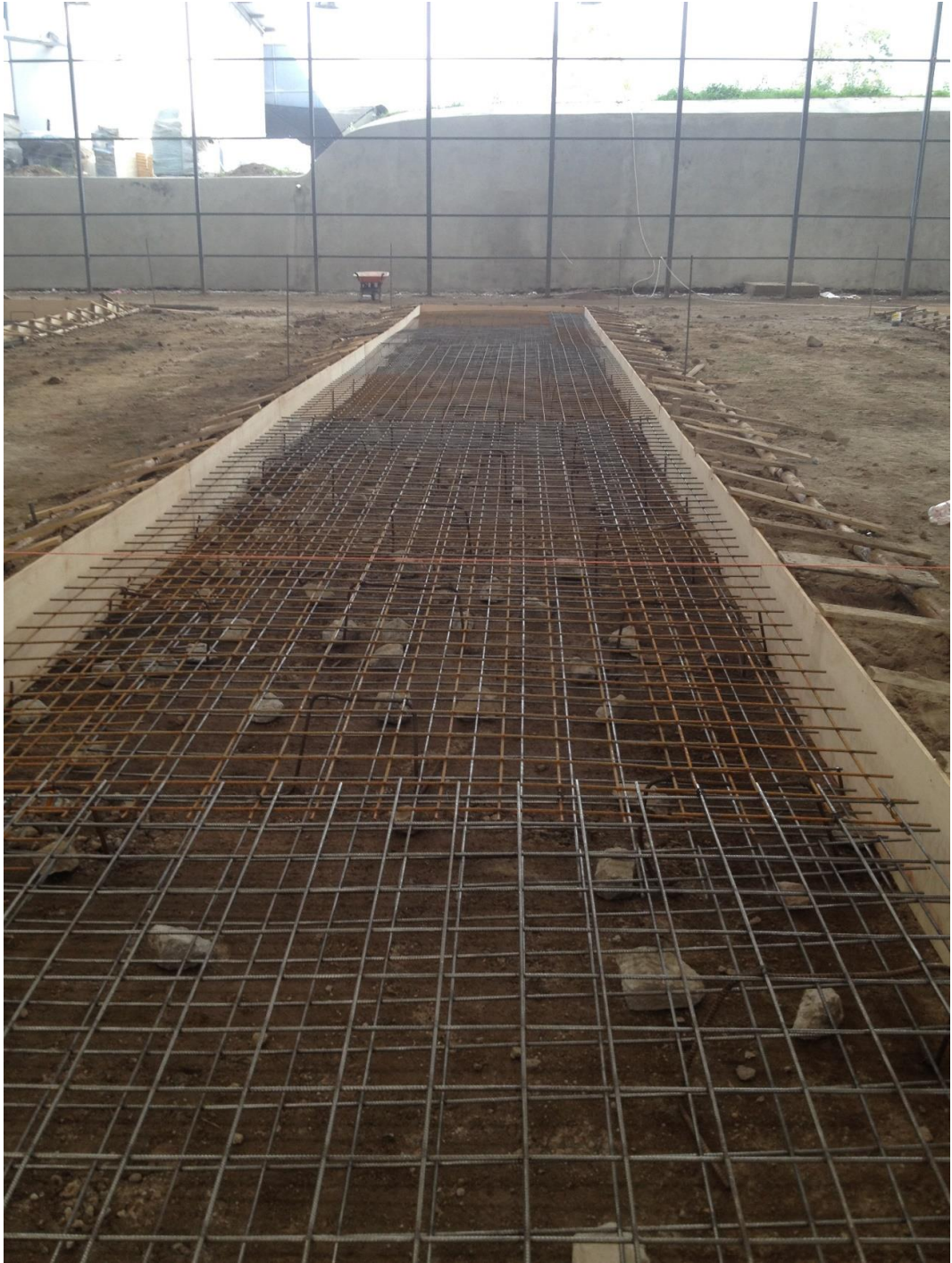


FOTOGRAFÍA 11 – IMPRENTA.





FOTOGRAFÍA 12 – IMPRENTA.



FOTOGRAFÍA 13 – IMPRENTA.





FOTOGRAFÍA 14 – IMPRENTA.

## ANEXO 2 – ESPECIFICACIONES TECNICAS FABRICANTE

### IMPRENTA HEILDELBURG

#### Servicio Técnico

SpeedMaster SX102-8P

Señores:

IMPRENTA MARISCAL

Atención:

Sr. Andrés Valdivieso

Ciudad:

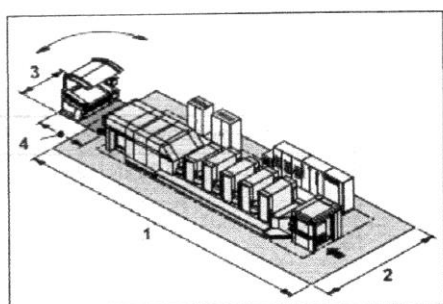
Quito

ASUNTO:

Información prensa SX 102-8P

#### Especificaciones de emplazamiento y demanda de espacio

A continuación se detalla el espacio mínimo requerido para la correcta operación de la prensa modelo SpeedMaster SX102-8P:



Modelo SX102-8P	Salida prolongada	Longitud [m] ([ft])	Anchura [m] ([ft])	Superficie [m <sup>2</sup> ] ([sq ft])
SX 102-8-P	-	19,62 (64.37)	6,50 (21.33)	127,6 (1373.1)

Modelo	Longitud [m] ([ft])	Anchura [m] ([ft])	Superficie [m <sup>2</sup> ] ([sq ft])
Prinect Press Center	2,02 (6.63)	2,28 (7.48)	4,6 (49.6)

#### Fundamento de la máquina

Los datos de este capítulo ofrecen al especialista de estructuras portantes las proporciones necesarias para elaborar una cimentación segura y para garantizar la funcionalidad de la máquina de imprimir. Durante el diseño de la cimentación se deberán tener en cuenta los siguientes puntos:

- Los coeficientes del suelo.
- Las cargas de la máquina.
- Las fuerzas dinámicas.
- El valor de asentamiento máximo permitido.
- La resistencia a la flexión de la placa de fundamento y todas las demás condiciones del entorno (por ejemplo, emanación de ruidos que pueden propagarse por los cuerpos sólidos y cargas dinámicas).

**HEIDELBERG**

## Servicio Técnico

Si se requieren más datos sobre la elaboración del fundamento, se ruega ponerse en contacto con la correspondiente representante de Heidelberg.

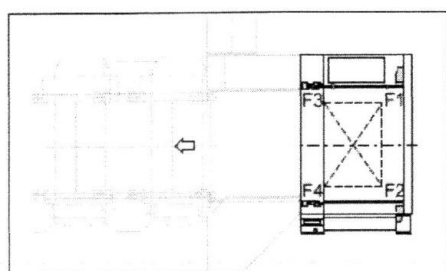
Modelo de máquina	Peso de la máquina [kg] ([lbs])		
	Salida prolongada	Sin pila	Incl. dos pilas
SX 102-8-P	-	54710 (120615)	56400 (124341)

El peso de la máquina se refiere al peso total de la máquina de imprimir sin equipos periféricos.

### Pesos de los componentes de la máquina

Componentes de la máquina	Peso [kg] ([lbs])
Marcador Preset Plus	2850 (6285)
Cuerpo impresor con dispositivo inversor	6210 (13690)
Salida Preset Plus sin módulo de prolongación	4980 (10980)

### Marcador Preset Plus

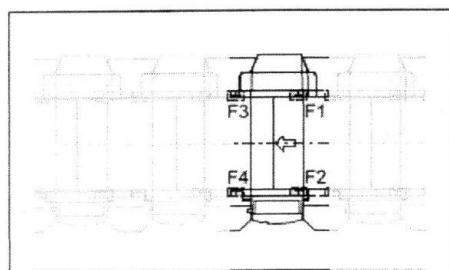


Fuerzas de apoyo estático	
F1	10,00 kN (2250 lbf)
F2	10,00 kN (2250 lbf)
F3	20,00 kN (4500 lbf)
F4	20,00 kN (4500 lbf)

Fuerzas de apoyo estático del marcador Preset Plus.

Las fuerzas de apoyo estático del marcador Preset Plus se han calculado con una pila de papel de 1500 kg (3310 lbs).

### Cuerpo Impresor central (con inversor)

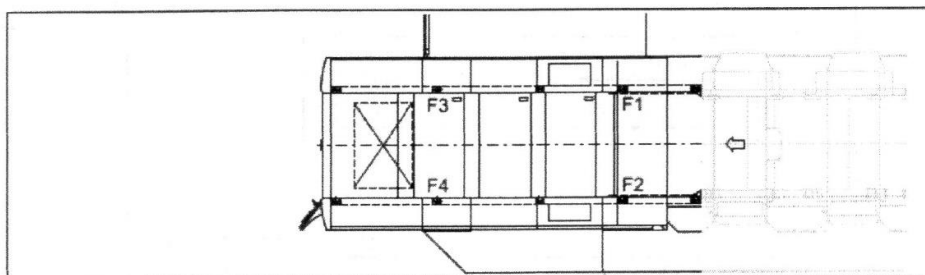


Fuerzas de apoyo estático	
F1	19,33 kN (4345 lbf)
F2	17,10 kN (3845 lbf)
F3	11,96 kN (2690 lbf)
F4	10,58 kN (2380 lbf)

**HEIDELBERG**

## Servicio Técnico

### Salida Preset Plus sin módulo de prolongación



Fuerzas de apoyo estático	
F1	11,70 kN (2630 lbf)
F2	11,70 kN (2630 lbf)
F3	28,80 kN (6470 lbf)
F4	28,80 kN (6470 lbf)

### Presión superficial estática máxima

La presión estática superficial máxima es de 120 N/cm<sup>2</sup>.

Se entiende por presión estática máxima superficial la presión superficial estática máxima que se produce bajo las patas regulables de los cuerpos impresores o del cuerpo barnizador.

Este valor contiene un factor de seguridad que garantiza que los cuerpos impresores reposen sobre las cuatro patas y que su peso estático, por tanto, no se concentre en un punto determinado.

La superficie de una pata ajustable es de:

- en el cuerpo impresor: 252 cm<sup>2</sup> (39.06 sq in).

### Requisitos del material

Recomendamos instalar un fundamento con asiento flexible debidamente reforzado y una calidad de hormigón de por lo menos C30/37 según EN 206/1.

### Cimentación

El asentamiento absoluto del fundamento de hormigón tras su emplazamiento y antes de la instalación de los cuerpos impresores no tiene repercusiones significativas para la máquina de imprimir.

Una vez montada y alineada la máquina de imprimir, ya no se debe producir ningún asentamiento adicional e irregular del fundamento que supere el límite de 0,03 mm/m (0.36 mil/ft). Este valor límite es válido tanto en sentido longitudinal (flexión) como en sentido transversal (torsión).

Un asentamiento uniforme de la base de hormigón que no deforme la máquina de imprimir no es crítico.

### Valor límite de las tolerancias de la planeidad

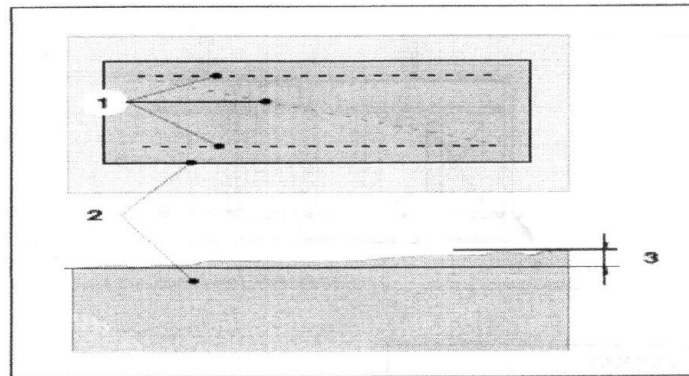
Las diferencias admisibles de planeidad en un fundamento de máquina con superficie acabada es de 15 mm (0.59 in) como máximo.

Las tolerancias de planeidad pueden determinarse mediante una medición diagonal en función de la superficie del fundamento de la máquina. Además, se recomienda realizar dos mediciones adicionales en la superficie prevista para las zapatas de nivelación.

**HEIDELBERG**

## Servicio Técnico

La norma DIN 18202 provee información adicional y contiene las tolerancias de planeidad admisibles.



### Cargas dinámicas del fundamento

Durante el funcionamiento de la máquina de imprimir, se transmiten fuerzas dinámicas al suelo.

La frecuencia con la cual las fuerzas dinámicas son emitidas al fundamento depende estrictamente de la velocidad de impresión de la máquina de imprimir. Las fuerzas sincronizadas con la velocidad constituyen la mayor parte. La causa está en los desequilibrios restantes de los cilindros de una vuelta. La amplitud de las fuerzas de desequilibrio transmitidas crece al cuadrado en relación con la velocidad de impresión.

La frecuencia de estimulación equivale a la velocidad de impresión y se puede calcular del modo siguiente:

$f = \text{velocidad de impresión [pliegos/h]} / 3600 = \text{resultado en Hz.}$

Además, en medida menor, se presentan fuerzas de mayor orden cuya frecuencia de estimulación depende también directamente de la velocidad de impresión.

Para la elaboración del fundamento, serán relevantes las fuerzas dinámicas hasta el 5º orden. (Frecuencia de giro quintupla).

El total de las fuerzas dinámicas que se transmiten de la máquina de imprimir al fundamento será de Máximo 4 % de la fuerza del peso de la máquina de imprimir.

Las fuerzas dinámicas se reparten de la forma siguiente:

- Fuerzas de una vuelta (desequilibrio restante): 2 %
- Fuerzas del 2º al 5º orden (repartición uniforme): 2 %.

### Compactación del suelo bajo la placa de fundamento

Se recomienda compactar el suelo bajo la placa de fundamento con material con gran capacidad de carga y compresión al 97% de densidad Proctor.

Espesor Proctor: espesor de referencia para la determinación del grado de compresión de un suelo.

### Factor de rigidez de la placa de fundamento

En la elaboración del fundamento, prestar atención a que la placa de fundamento sea altamente rígida. De este modo, se reduce la flexión estática y, a menudo, también el problema de las oscilaciones de flexión del fundamento.

### Instalación de la máquina de imprimir sobre un fundamento desacoplado

Cuando se monta la máquina en un fundamento desacoplado, el fundamento debe presentar una rigidez suficiente.

**HEIDELBERG**

4



## Servicio Técnico

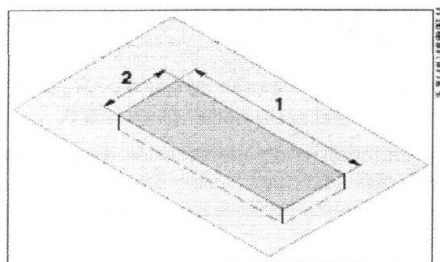
Así mismo, si realiza este tipo de instalación, tenga en cuenta una masa suficiente del fundamento y capas de aislamiento adecuadas. De este modo, evitará un hundimiento no permitido de la placa de fundamento, como ejemplo al cargar las pilas.

Contemple igualmente el desacoplamiento directo de la máquina de imprimir y del accionamiento principal mediante las placas de aislamiento.

### Nota

La instalación sobre un fundamento desacoplado o sobre placas de aislamiento requiere una disposición especial. Póngase en contacto con su representante Heidelberg.

### Dimensiones del fundamento



Válido para todos los modelos de la máquina de la serie SX:

1.- Longitud recomendada.

2.- Anchura recomendada: 2.000 mm (78.74 in)

La demanda de superficie requerida para el accionamiento principal no está incluida en las dimensiones del fundamento, consultar el plano de piso anexo.

Máquina SX102-8P	Longitud recomendada del fundamento [mm] ([in])	
	Salida prolongada	
SX 102-8-P	-	15620 (614.96)

### Información técnica de protecciones y especificaciones eléctricas

Las máquinas HEIDELBERG poseen el sistema de control electrónico SheetFeedControl™ e interfaz para el usuario PrinectPressCenter™ e InpressControl™ poseen como protección para el IPC (Industrial Personal Computer) una unidad UPS la cual se encarga a través de un software de la desconexión segura ante la falta del suministro eléctrico.

El armario de control del sistema SheetFeedControl™ y mandos descentralizados poseen integrados filtros anti-señales parásitas acordes con las normas internacionales.

Para evitar posibles perturbaciones debido a influencias electromagnéticas, los componentes eléctricos y electrónicos de las máquinas de imprimir Heidelberg AG están contruidos y comprobados de acuerdo a las directivas de CEM vigentes. Se cumplen los requisitos de protección según EN 61000-6-2 y EN 61000-6-4; por lo que se sugiere tener una puesta a Tierra independiente, con un valor menor a 3 ohms.

Por regla general, la máquina de imprimir se conecta a la red de corriente trifásica a través del armario de distribución ZSG.

**HEIDELBERG**

## Servicio Técnico

La tensión de servicio de la máquina de imprimir es de AC 400 V.

En las redes con tensiones de AC 380 V, AC 400 V y AC 415 V es posible establecer una conexión directa en caso de que se trate de una red con neutro puesto a tierra.

Para redes con tensiones inferiores a AC 380 y superiores a AC 415 V, Heidelberg suministra un transformador de la tensión de red adicional. Se trata de un autotransformador o un transformador de aislamiento.

Los datos eléctricos de conexión sin secador IR y temperización de rodillos son los siguientes:

Voltaje	Potencia	Corriente	Factor de potencia	Fusible
220 V (3PH)	117 KW	362 A	0.85 $\lambda$	500 A
400 V (3PH)	117 KW	199A	0.85 $\lambda$	250 A

Las máquinas Heidelberger Druckmaschinen AG admiten un rango de tensión de trabajo +/- 10% de la tensión de alimentación, de la frecuencia estática de +/-1% y de frecuencia momentánea +/-2%.

La diferencia de tensión entre la tensión nominal de la red (estación de interconexión de la empresa productora y distribuidora de energía) y la tensión en los bornes deberá ser máximo del 10 %.

La selección del tipo de protección puede ser tipo breaker o disyuntor regulable para 3 polos.

### Equipos periféricos

Los equipos periféricos como Airstar3000, technotrans BetaC 280L son equipados para refrigeración por agua, es decir en sus intercambiadores de calor o evaporadores va a existir una transferencia de calor a base de agua temperada.

Para generar y recircular este líquido refrigerado o temperado es necesario instalar una unidad de intercambio de calor aire/ agua o refrigeración forzada junto con un sistema de recirculación. (La cual no se suministra junto con la máquina).

Equipos periféricos	Capacidad de calor extraído
Technotrans Beta C208L	52 KW
Airstar 3000	15 KW

Los datos de capacidad frigorífica del equipo a ser utilizado no deben ser menor a 67 KW/ 228.613,49 BTU. En el caso de utilizar un intercambiador de calor Aire/agua la temperatura ambiental no debería superar los 40°C y la capacidad del equipo debe ser no menor a 70 KW.

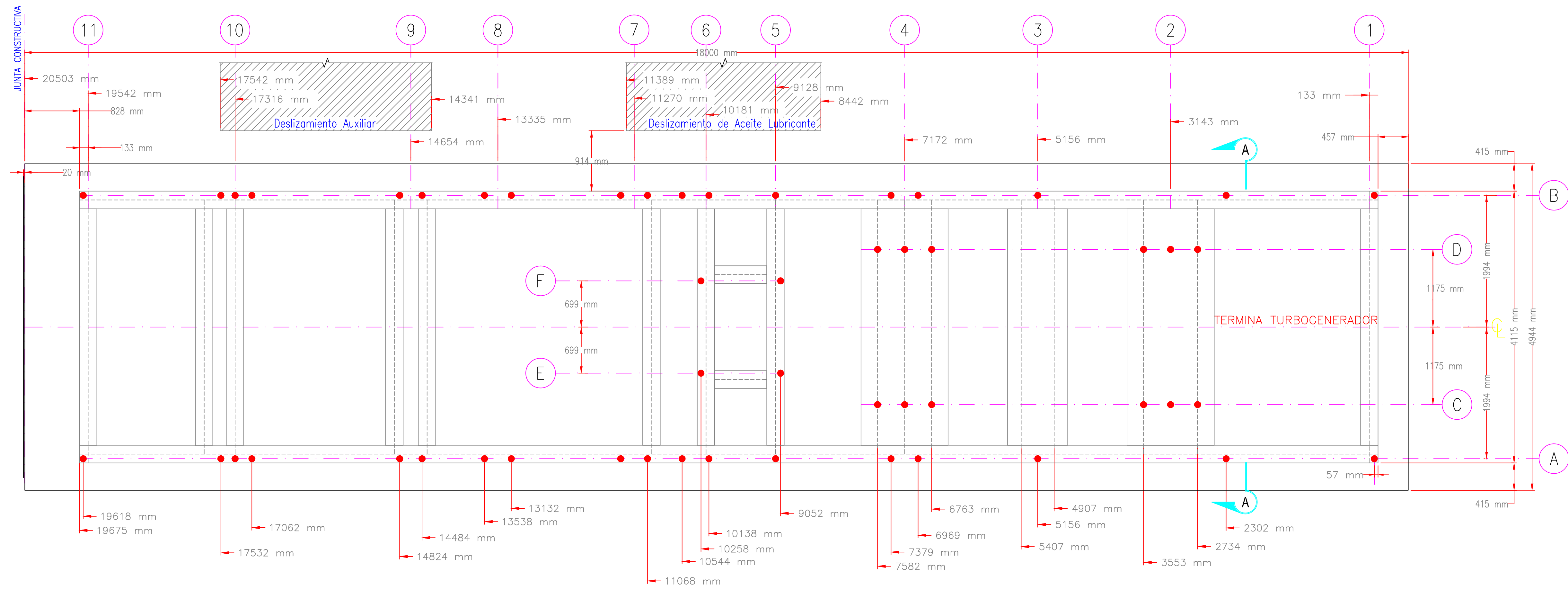
La presión necesaria para la circulación es de 4 a 6 Bares a una temperatura de 25°C.

**HEIDELBERG**

6

**ANEXO 3 – PLANO TURBO GENERADOR TURBOGENERADOR GE  
LM-6000.**

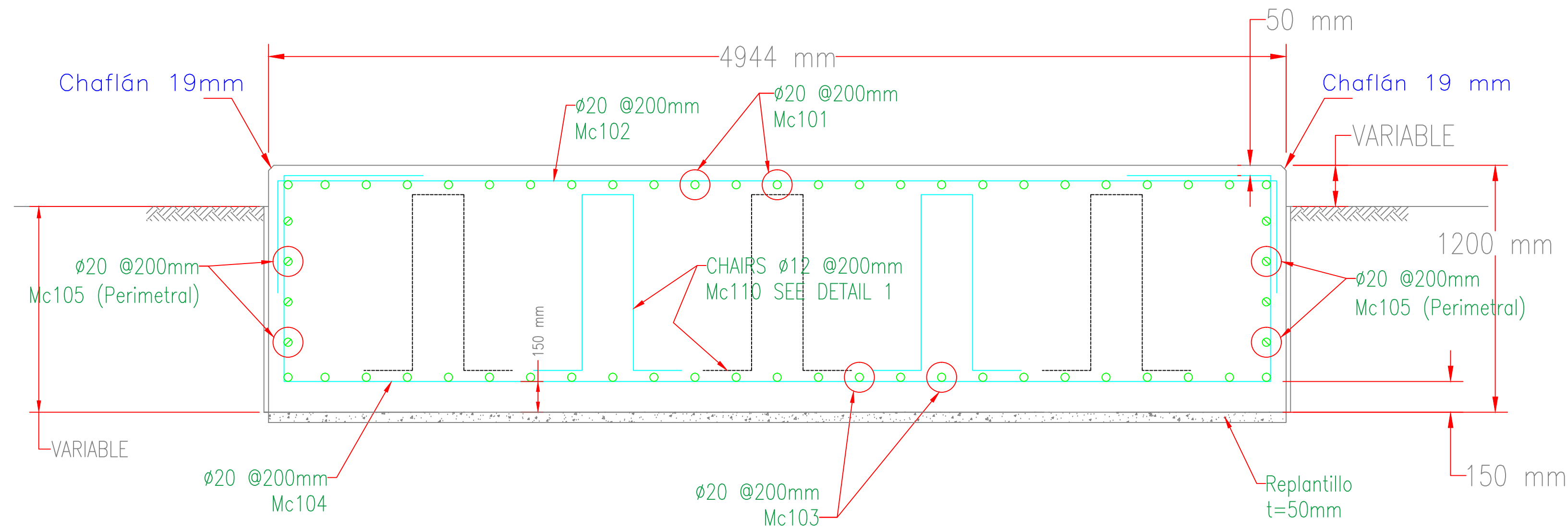




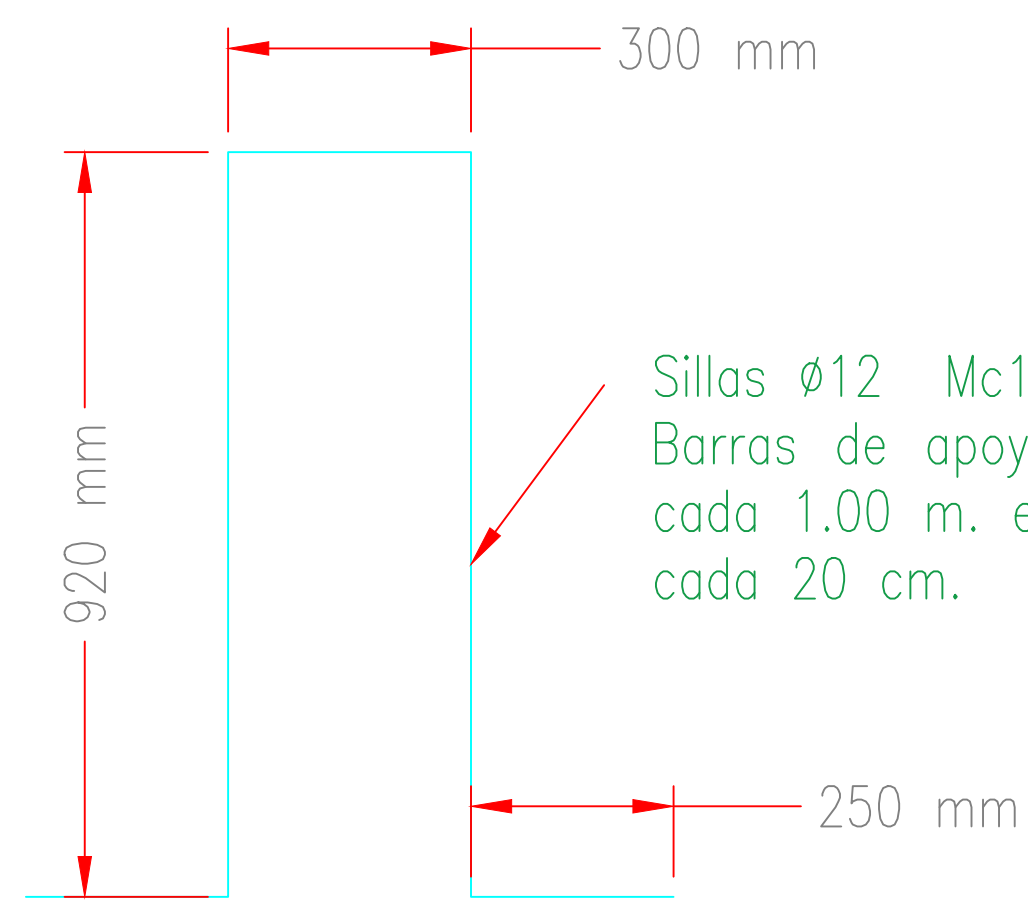
LEYENDA  
• PERNO DE ANCLAJE

PLANO DE CIMENTACIÓN  
ESCALA: 1:50

JUNTA DE AISLAMIENTO  
Se debe proveer un material expansivo entre la cimentación y estructuras de hormigón adyacentes. Se recomienda una Junta mínima de 16 mm, de un material asfáltico impregnado de fibras, de madera o un material de espuma de celulas abiertas. Se recomienda utilizár poliestireno de expansion.

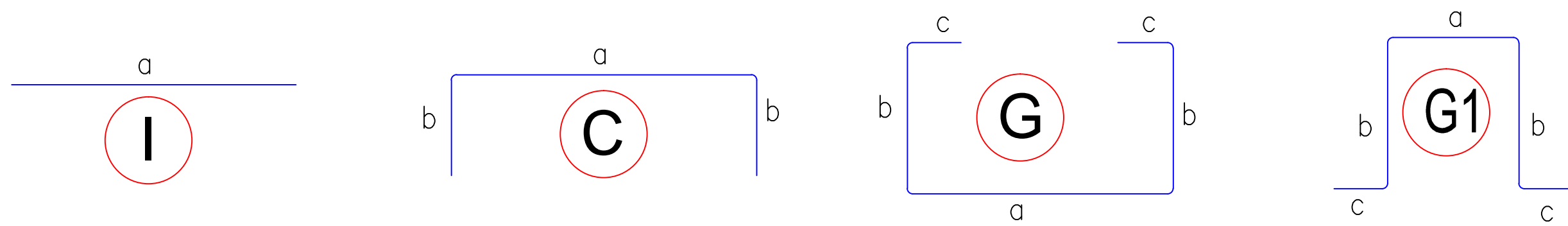


SECCIÓN A-A  
ESCALA 1:30



DETALLE 1  
SCALE: 1:20

## RESUMEN DE ACEROS



Mc	Ø (mm)	Tipo	No.	DIMENSIONES (m)				LONGITUD (m)	
				a	b	c	d	Parcial	Total
101	20	I	25	12.00				12.00	300.00
102	20	C	90	4.84	0.48			5.80	522.00
103	20	I	25	12.00				12.00	300.00
104	20	G	90	4.84	1.00	0.58		8.00	720.00
105	20	I	8	12.00				12.00	96.00
110	12	G1	90	0.30	0.92	0.28		2.70	243.00

RESUMEN DE MATERIALES				
Acero de Refuerzo			Concreto	
Ø (mm)	Longitud (m)	Peso (Kg)	Elemento	VOL (m3)
20	1938.00	4779.108	Cimentación	108
12	243.00	215.784	Replantillo	4.5

## PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

HORMIGÓN DE REPLANTILLO  $f'_c = 140 \text{ Kg/cm}^2$   
HORMIGÓN  $f'_c = 240 \text{ Kg/cm}^2$   
ACERO DE REFUERZO  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$

PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATOLICA DEL ECUADOR.

NOMBRE: Luca Limaico A.

LAMINA  
#: 1 de 1

DESCRIPCIÓN: Cimentación GE LM-6000

ESCALA: Indicada

TAMAÑO: A0